МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

ВІСНИК

Східноукраїнського національного університету імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 1 (287)
2025

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Київ 2025

ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 1 (287) 2025

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ
ВИХІД З ДРУКУ - ДВАНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК
Засновник
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
Журнал зареєстровано в Міністерстві юстиції України
Свідоцтво про державну реєстрацію **серія КВ № 15607-4079ПР від 18.08.2009 р.**

VISNIK
OF THE VOLODYMYR DAHL EAST UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 1 (287) 2025

THE SCIENTIFIC JOURNAL
WAS FOUNDED IN 1996
IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR
Founder
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
Registered by the Ministery of Justice of Ukraine
Registration **Certificate** **KB № 15607-4079ПР dated 18.08.2009**

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

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

ISSN 1998-7927(print)
ISSN 2664-6498 (online)

Відповідальний за випуск: д.т.н., професор Лорія М.Г.
Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 6 від 28 лютого 2025 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

З М І С Т

Спеціальність 122

Спеціальність 132

Спеціальність 133

Спеціальність 141

Спеціальність 151

Спеціальність 161

Спеціальність 273

CONTENTS

Speciality 122

Speciality 132

Speciality 133

Speciality 141

Speciality 151

Speciality 161

Speciality 273

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-5-11

УДК 004.41:004.65

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ІЄРАРХІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ДОКУМЕНТО-ОРІЄНТОВАНИХ БАЗАХ ДАНИХ

Дьомін М.К., Полупан Ю.В.

ANALYSIS OF METHODS FOR REPRESENTING HIERARCHICAL INFORMATION IN DOCUMENT-ORIENTED DATABASES

Domin M.K.,Polupan Yu.V.

Вибір ефективного методу представлення ієрархічної інформації у базах даних є важливим завданням при проєктуванні програмних систем, оскільки ієрархічні структури даних використовуються в багатьох сферах, зокрема у системах рекомендацій, управлінні ланцюгами поставок та аналітичних рішеннях. У статті аналізуються різні методи зберігання ієрархічних структур у документо-орієнтованих базах даних на прикладі MongoDB та порівнюється їх ефективність.

При роботі з невеликою кількістю ієрархічних даних майже будь-який метод буде функціонувати з прийнятною швидкістю. Однак у випадках, коли система працює з сотнями і навіть тисячами ієрархій, неправильний вибір способу їх зберігання може суттєво вплинути на продуктивність системи, збільшити операційні витрати та ускладнити обробку даних.

У рамках дослідження проаналізувані методи представлення ієрархічних структур у документо-орієнтованих базах даних, виявлені їх переваги, недоліки та визначена їх швидкодія у реальних сценаріях використання.

Документо-орієнтовані бази даних, такі як MongoDB, надають гнучкі можливості для зберігання ієрархічних даних. У MongoDB можна використовувати кілька підходів до представлення ієрархій: метод збереження матриці суміжності, метод матеріалізованих маршрутів та метод вкладених множин.

У статі наведені результати тестування швидкодії зазначених методів для двох сценаріїв, а саме при використанні бази даних, встановленої на власний сервер, а також при використанні бази даних хмарного сервісу Microsoft Azure.

Вибір методу залежить від конкретних вимог до швидкості вибірки, задіяних операцій з ієрархіями та складності реалізації.

Метод збереження матриці суміжності показав себе набагато краще, ніж при роботі з реляційними базами даних і може використовуватися в багатьох сценаріях, оскільки він є найпростішим в реалізації. Але якщо для програмної системи характерні часті вибірки ієрархії або їх частин, то можна рекомендувати використання методу матеріалізованого маршруту оскільки він працює значно швидше, хоча і є більш складним у реалізації, та потребує більше пам'яті для збереження ієрархічної інформації. Метод вкладених множин не надає відчутних переваг для найбільш типових сценаріїв роботи. Дослідження є корисним для розробників, які проєктують системи, що працюють з великими обсягами ієрархічної інформації.

Ключові слова: *документо-орієнтовані бази даних, MongoDB, ієрархічна інформація, тестування швидкодії, Microsoft Azure, одиниці запиту.*

Вступ

Вибір ефективного методу представлення ієрархічної інформації у базах даних є надзвичайно важливим завданням у проектування програмних систем. Необхідність зберігання ієрархічної інформації виникає доволі часто. Але якщо при роботі з відносно невеликої кількістю ієрархічної інформації будь який метод представлення ієрархій буде працювати з задовільної швидкістю, то є завдання які потребують роботи з сотнями різних ієрархій і у цьому випадку вибір

найкращого методу може суттєво поліпшити швидкодію системи та знизити операційні витрати.

У якості прикладів таких завдань наведемо системи рекомендації контенту або управління ланцюгами поставок. Ієрархія рекомендацій відноситься до структурованого способу, у якому рекомендації генеруються та вдосконалюються, часто на основі кількох рівнів даних. Це зазвичай використовується в системах рекомендацій вмісту, таких як YouTube, Netflix і платформах електронної комерції, таких як Amazon. Ієрархія рекомендацій побудована з використанням кількох рівнів фільтрації, агрегації та персоналізації для динамічного вдосконалення пропозицій. Наприклад, для стримінгово сервісу можуть бути такі рівні ієрархії: популярні фільми у всьому світі, популярні фільми у країні, жанрові переваги користувача, відповідність історії переглядів, коригування рекомендацій на основі останніх дій користувача. І майже при кожному запиті користувача система повинна отримувати дані з ієрархії чи оновлювати деякі частини у існуючих ієрархічних структурах [1]. При управлінні ланцюгом поставок кожен продукт має специфікацію матеріалів (BillofMaterials), можливо із тисячами підкомпонентів. Компанії відстежують мільйони продуктів, що переміщуються через фабрики, склади та роздрібні торгові мережі [2]. Аналітика в режимі реального часу повинна обробляти тисячі дерев специфікації, щоб виявити проблеми з постачанням.

У власній практиці ми зіткнулися з необхідністю обрання найкращого методу представлення ієрархічної інформації при роботі над створенням бази даних інформаційно управлінських архітектур. Результати роботи по аналізу методів представлення ієрархічної інформації для реляційних баз даних опубліковані у роботі [3]. Також можна відзначити, що для завдання створення бази даних інформаційно-управлінських архітектур доволі добре підходять документо-орієнтовані системи керування базами даних, наприклад, MongoDB. Вимоги, що визначені при проєктуванні системи моніторингу інформаційно-управлінських архітектур до баз даних, що використовуватимуться системою, зазначені у [4]. Наприклад, для такої бази даних не важлива транзакційність, а гнучкість структури даних є великою перевагою. Першим етапом у визначенні доцільності використання документно-орієнтованої бази даних для системи моніторингу інформаційно-управлінських архітектур є визначення можливості ефективно зберігати і обробляти ієрархічну інформацію при використані такої бази даних.

Хоча задача виникла при роботі над створенням системи моніторингу інформаційно-управлінських архітектур, але дослідження має самостійну цінність і його результати можуть використовуватись для проєктування будь-яких систем, що потребують роботи з великою кількістю ієрархічної інформації, приклади яких вже були наведені у статті.

Загальний порівняльний аналіз швидкодії MongoDB у порівнянні з реляційними системами керування базами даних наведений у [5].

Можливі методи представлення ієрархічної інформації наведені у документації до системи керування базами даних MongoDB [6]. Там зазначені такі методи: збереження посилання на батьківський вузол, збереження посилання на дочірні вузли, збереження масиву батьківських вузлів, збереження матеріалізованих маршрутів, метод вкладених множин. Перші два методи – це варіанти зберігання інформації про графи, які неявно використовують таку структуру даних як матриця суміжності. Вони мають схожі методи роботи та швидкодію. Для цілей дослідження буде достатньо розглянути один з них, а саме метод, заснований на збереженні посилання на батьківський вузол. Збереження масиву батьківських вузлів є варіацією методу матеріалізованих маршрутів. Ці два методи так само мають схожу (майже ідентичну) реалізацію та схожу швидкодію. Але метод матеріалізованих маршрутів виявляється трошки швидшим, адже MongoDB ефективніше обробляє окремі строки, а не масиви строкових даних. Для даного дослідження нам достатньо розглянути один з цих методів, а саме метод матеріалізованих маршрутів.

Наведемо основи обраних методів. Наприклад, необхідно зберегти дані про ієрархію, що представлена на рисунку 1.

Найбільш простим для реалізації є метод збереження посилання на батьківський елемент. При використанні цього методу документи, що моделюють ієрархію виглядатимуть, як вказано у лістингу 1.

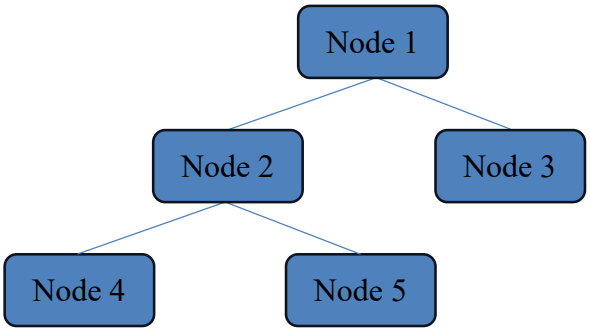


Рис. 1. Приклад ієрархії для збереження у базі даних.

```
{
 "key": 1,
 "name": "Node 1"
},
{
 "key": 2,
 "parent": 1,
 "name": "Node 2"
},
{
 "key": 3,
 "parent": 1,
 "name": "Node 3"
},
{
 "key": 4,
 "parent": 2,
 "name": "Node 4"
},
{
 "key": 5,
 "parent": 2,
 "name": "Node 5"
}
```

Лістинг 1. Структура документів, що моделює ієрархію методом збереження посилання на батьківський вузол

Метод збереження матеріалізованого маршруту полягає у збереженні спеціальної строки, що містить ідентифікатор вузла, а також ідентифікатори усіх батьківських вузлів, розділених за допомогою спеціального символу. При використанні цього методу документи, що моделюють ієрархію виглядатимуть, як вказано у лістингу 2.

Метод вкладених множин був вперше запропонований Джо Селко в [7]. Він заснований на обході ієрархії у прямому порядку. Вважається, що кожен вузол відвідується двічі (на спуску та на поверненні). Починається обхід при значенні лічильника 1. При кожному відвідуванні вузла лічильник збільшується на 1. При першому відвідуванні вузла значення лічильника зберігається у полі"left", а при другому – у полі "right". Можливість роботи ієрархічної інформації забезпечується тим, що для всіх дочірніх вузлів деякого елемента ієрархії виконуються такі умови:
$"left"_{дочірнього} > "left"_{батьківського}$ та $"right"_{дочірнього} < "right"_{батьківського}$. При використанні цього методу документи, що моделюють ієрархію виглядатимуть, як вказано на лістингу 3.

```
{
  "key": 1,
"path": "1.",
  "name": "Node 1"
},
{
  "key": 2,
  "path": "1.2.",
  "name": "Node 2"
},
{
  "key": 3,
  "path": "1.3.",
  "name": "Node 3"
},
{
  "key": 4,
  "path": "1.2.4.",
  "name": "Node 4"
},
{
  "key": 5,
  "path": "1.2.5.",
  "name": "Node 5"
}
```

Лістинг 2. Структура документів, що моделює ієрархію методом збереження матеріалізованого маршруту

Метою роботи є порівняння ефективності різних методів представлення ієрархічної інформації в докумнто-орієнтованій СКБД MongoDB за результатами тестування швидкодії зазначених методів та визначення доцільності використання цих методів у типових сценаріях.

```
{
 "key": 1,
 "left": 1,
 "right": 10
 "name": "Node 1"
},
{
 "key": 2,
 "left": 2,
 "right": 7
 "name": "Node 2"
},
{
 "key": 3,
 "left": 3,
 "right": 4
 "name": "Node 3"
},
{
 "key": 4,
 "left": 5,
 "right": 6
 "name": "Node 4"
},
{
 "key": 5,
 "left": 7,
 "right": 8
 "name": "Node 5"
}
```

Лістинг 3. Структура документів, що моделює ієрархію методом вкладених множин

Виклад основного матеріалу

Спочатку оцінимо складність реалізації типових операцій роботи з ієрархіями при використанні зазначених методів. Найпростішим для реалізації є метод збереження матриці суміжності. Операції додавання елементів, видалення окремих елементів або цілого піддерева та модифікації ієрархії (зміна батьківського вузла для піддерева) реалізуються тривіально. Єдина операція, яка могла б спричинити труднощі в реалізації, це операція вибірки всієї ієрархії або її частини. При роботі з реляційними системами керування базами даних для таких операцій потрібна підтримка рекурсивних збережених процедур і реалізація не є тривіальної. При використанні MongoDB для реалізації цієї операції можна використати aggregatepipeline [8]. Реалізація цього запиту для структури документів з лістингу 2 представлена у лістингу 4.

Бачимо, що MongoDB має спеціальну операцію «graphLookup», що безпосередньо може використовуватися при роботі з ієрархічними даними. Зазначимо, що документ, що повертається цим запитом має дещо незвичну структуру. Документ верхнього рівня описує вузол, що представляє корінь дерева, до якого додане поле «childNodes», що містить всі інші вузли дерева. Ця структура потребує спеціальної обробки у клієнтському коді, але ускладнення реалізації є незначними. Також, всі дочірні вузли відсортовані по рівнях ієрархії, що робить таку структуру зручною для конструювання на її основі структури даних «дерево» у клієнтському коді.

```
db.Nodes.aggregate([
  {
    $match: {
"ɯdentifier": 1
    }
  },
  {
"$graphLookup": {
"from": "Nodes",
"startWith": "$identifier",
"connectFromField": "identifier",
"connectToField": "parentIdentifier",
"as": "childNodes",
"depthField": "string"
    }
  }
])
```

Лістинг 4. Запит для отримання ієрархії при використанні методу збереження матриці суміжності

Метод збереження матриці суміжності є найпростішим в реалізації.

При використанні методу матеріалізованого маршруту операції додавання вузла у ієрархії та операції видалення вузла чи піддерева реалізуються дуже просто. А ось операція зміни батьківського вузла вже реалізується дещо складніше. Хоча безпосередньо реалізація не є складної, бо потрібно лише оновити значення маршруту для кожного вузла піддерева, що змінює позицію у ієрархії. Але, якщо можливе одночасне виконання подібних операцій, то необхідну синхронізацію потрібно буде реалізовувати у клієнтському коді, бо СКБД не підтримує транзакціонність, а атомарність операцій підтримується лише на рівні окремих документів. Це значно ускладнює реалізацію. Але реалізація вибірки ієрархії чи її частини є простішою за метод збереження матриці суміжності, хоча вона і потребує використання регулярних виразів. Запит для отримання ієрархії представлений у лістингу 5.

```
db.Nodes.find({path: {$regex: /^1006\./}})
.sort({path: 1})
```

Лістинг 5. Запит для отримання ієрархії при використанні методу збереження матеріалізованого маршруту

Сортування необхідно для того, щоб отримати дані у вигляді, зручному для відновлення ієрархії на стороні клієнта. У такому разі після інформації про елемент ієрархії відразу ж слідують дані про дочірні вузли. Насправді цей порядок робить конструювання дерева на стороні клієнта ще простішим ніж порядок з методу збереження матриці суміжності, але і той порядок є достатньо ефективним.

Метод вкладених множин є найскладнішим в реалізації. Тут при реалізації будь-якої операції може знадобитися оновлення значної частини вузлів ієрархії, навіть тих, що не мають відношення до тієї частини ієрархії, що оновлюється. Ці оновлення реалізувати доволі складно і вони мають бути реалізовані у клієнтському коді бо mongoDB не підтримує тріггерів. Виключенням є реалізація MongoDBAtlas, але вона доступна лише на єдиному хостінгу. Одже при реалізації будь яких операцій оновлення ієрархії розробники будуть стикатися з викликами синхронізації, такими самими що і при реалізації зміни батьківського вузла для методу матеріалізованого маршруту. Реалізація запиту для отримання ієрархії при використанні цього методу наведена у лістингу 6.

```
db.Nodes.find({$and:[{left: {$gte: 0}},
{left: {{$lte: 124}}, {right: {$lte: 124}}]})
.sort({left: 1})
```

Лістинг 6. Запит для отримання ієрархії при використанні методу вкладених множин

У цьому прикладі значення полів left та right є 0 та 124 відповідно. Зазначимо, що перевірка на те, що значення left має також бути меншим за 124 не є необхідним, бо ця нерівність і так завжди виконується. Однак додавання цієї перевірки необхідно для ефективного задіяння індексів, бо без неї виконується сканування всіх документів для яких значення left більше за 0. Для цього прикладу це взагалі всі документи. При використанні двох перевірок для поля leftMongoDB ефективно визначає документи, що представляють вузли дерева за допомогою використання індексів.

Перейдемо до порівняння ефективності методів у завданнях вибірки даних. Було проведено експеримент із тестування обраних методів. Далі наводиться опис цього експерименту та його результати.

Для аналізу ефективності була створена тестова база даних, у якій ієрархічна інформація представлена відразу трьома методами. БД була заповнена тестовою інформацією, що включає 10000 ієрархій. Розміри ієрархій варіюються від 40 до 5500 елементів, середній розмір ієрархій – 300 елементів, максимальна глибина – 6, максимальна кількість дочірніх елементів – 9 (середня кількість 5). Всі вузли ієрархії зберігалися у колекції «Nodes» що була проіндексована по всім полям, що використовуються будь-яким з трьох методів.

Для тестування швидкодії методів був розроблений додаток, який виконував вибірку 10 ієрархій одного розміру 50 разів для кожного методу з заміром часу виконання всіх операцій. Після цього обчислювався середній час виконання однієї операції вибірки для кожного методу. Умови для тестування в усіх експериментах були однакові (ОС, поточне навантаження на систему тощо). Ми не зазначаємо конфігурації комп'ютера, що використовувався для тестування, бо у результаті експерименту нас цікавить виключно порівняння ефективності методів, а не абсолютні значення часу виконання. Результати цього експерименту слід застосовувати при використанні традиційного хостингу, наприклад, при встановленні СКБД MongoDB на виділений чи на віртуальний сервер. Результати для ієрархії двох різних розмірів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Швидкодія вибірки даних для різних методів представлення ієрархічної інформації (MongoDB)

Метод	Вибірка ієрархії розміром 300 елементів (глибина 4 рівня), мсек	Вибірка ієрархії розміром 5200 елементів (глибина 6 рівнів), мсек
Матриця суміжності	4,773	61
Матеріалізований маршрут	2,16	27,2
Вкладені множини	2,36	32,3

При розробці сучасних інформаційних систем часто використовуються хмарні сервіси. База даних MongoDB також може бути розміщена «у хмарі». Для запитів, що виконуються при хостінгу у хмарних сервісів буває важливіше знати вартість запитів у одиницях запиту (requestunits - RU). Використання одиниць запиту (RU) замість простого часу виконання (мілісекунди) є важливим, оскільки RU забезпечують узгоджену, незалежну від робочого навантаження міру продуктивності бази даних, тоді як час виконання може сильно відрізнятися. RU є кращим показником для розуміння того наскільки алгоритм є економічно ефективним. Наприклад простий індексований пошук може тривати 5 мс і використовувати 2 RU, а повне сканування таблиці також може тривати 5 мс, але споживати 200 RU. Лише RU показують фактичну вартість запиту [10].

Для розуміння відносної ефективності методів було проведене додаткове тестування з використанням хмарного хостінгу Microsoft Azure. У цьому разі не знадобилося багаторазове виконання запитів, бо сервіс дозволяє отримати вартість запиту у RU. Результати додаткового експерименту наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Швидкодія вибірки даних для різних методів представлення ієрархічної інформації (AzureMongoDB)

Метод	Вибірка ієрархії розміром 300 елементів (глибина 4 рівня), RU	Вибірка ієрархії розміром 5200 елементів (глибина 6 рівнів), RU
Матриця суміжності	54,73	703
Матеріалізований маршрут	15,4	190
Вкладені множини	18,4	250

Висновки. У статті були проаналізовані можливі методи представлення ієрархічної інформації в документо-орієнтованих базах даних, на прикладі СКБД MongoDB. Був проведений експеримент по порівняльному тестуванню обраних методів.

Зазначимо, що на нашу думку, використання методу збереження матриці суміжності доцільно у разі, якщо часті вибірки ієрархій не є типовими для інформаційної системи. Насправді для великої кількості випадків цей метод можна обрати, як такий, що забезпечує достатню швидкодію та є найпростішим у реалізації.

Досить несподіваним виявилося те, що швидкодія методу вкладених множин є трохи меншої за швидкодію методу збереження матеріалізованого маршруту. При таких результатах ми не бачимо доцільності використання цього методу. Єдине, що слід зазначити, це те, що він використовує менше постійної пам'яті, ніж метод збереження матеріалізованого маршруту. Але зазвичай вузли ієрархій містять доволі багато інших даних, окрім даних про положення в ієрархії, тобто загальний виграш буде незначним.

Метод зберігання матеріалізованого маршруту виявився найшвидшим. Його доцільно використовувати у випадках, коли характерні часті операції вибірки ієрархій. Зазначимо також, що його економічна ефективність при використанні хмарних сервісів виявилася навіть більшою, ніж ефективність стосовно часу виконання.

Література

1. Dionysius: A Framework for Modeling Hierarchical User Interactions in Recommender Systems / J. Wang, K. Kenthapadi, K. Rangadurai, D. Hardtke. // arXiv preprint, 2017. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03849
2. Miller T. Hierarchical Operations and Supply Chain Planning. Springer London, London, 2001. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-0305-9
3. Дьомін М.К. Методи представлення ієрархічної інформації в реляційних базах даних інформаційно-управлінських архітектур. // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління, Запоріжжя: ЗНТУ, 2007, №1(17). С. 56-62.
4. Danich V.N. Information-administrative architecture conception and principles of their modeling. / V.N. Danich, M.K. Domin// TEKA. Commision of motorization and energetics in agriculture. – Lublin University of Technology, Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University in Lugansk, 2012. Vol. 12. No 4. P. 23-30.
5. Benymol J. Performance analysis of NoSQL and relational data bases with MongoDB and MySQL./ J. Benymol, A. Sajimon // Materials-Today-ProceedingsVolume 24, Part 3, 2020, p. 2036-2043. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.634
6. Model Tree Structures. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: //https://www.mongodb.com/docs/manual/applications/data-models-tree-structures/
7. Celko J. A Lookat SQL Trees / JoeCelko // DBMS online [Electronic resource] / Miller Freeman, Inc– Electronicmag. [USA]: *DBM S*and *Internet Systems, 1996*. March. DB [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.dbmsmag.com/9603d06.html, free. – Title from screen

8. Aggregation Pipeline. MongoDB Manual. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.mongodb.com/docs/manual/core/aggregation-pipeline/
9. What is MongoDB Atlas? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.mongodb.com/docs/atlas/
10. Request Unitsin Azure Cosmos DB [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://learn.microsoft.com/en-us/azure/cosmos-db/request-units?utm_source=chatgpt.com

References

1. Dionysius: A Framework for Modeling Hierarchical User Interactions in Recommender Systems / J. Wang, K. Kenthapadi, K. Rangadurai, D. Hardtke. // arXiv preprint, 2017. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03849
2. Miller T. Hierarchical Operations and Supply Chain Planning. Springer London, London, 2001. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-0305-9
3. Domin M.R. Methods for representation of hierarchical information in relational databases of information-administrative architechtures. // Radioelectronics. Informatics. Management, Zaporizhia: ZNTU, 2007, №1(17) P. 56-62.
4. Danich V.N. Information-administrative architecture conception and principles of their modeling. / V.N. Danich, M.K. Domin// TEKA. Commision of motorization and energetics in agriculture. Lublin University of Technology, Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University in Lugansk, 2012. Vol. 12. No 4. P. 23-30.
5. Benymol J. Performance analysis of NoSQL and relational databases with MongoDB and MySQL. / J. Benymol, A. Sajimon // Materials-Today-Proceedings Volume 24, Part 3, 2020, p. 2036-2043. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.634
6. Model Tree Structures. [Electronic resource]. – URL: https://www.mongodb.com/docs/manual/applications/data-models-tree-structures/
7. Celko J. A Lookat SQL Trees / Joe Celko // DBMS online / Miller Freeman, Inc– Electronicmag. – [USA]: *DBM S*and *Internet Systems, 1996*. – March. [Electronic resource]. – URL: http://www.dbmsmag.com/9603d06.html,free. – Title from screen
8. Aggregation Pipeline. MongoDB Manual. [Electronic resource]. – URL: https://www.mongodb.com/docs/manual/core/aggregation-pipeline/
9. What is MongoDB Atlas? [Electronic resource]. - URL: https://www.mongodb.com/docs/atlas/
10. Request Units in Azure Cosmos DB [Electronic resource]. –URL: https://learn.microsoft.com/en-us/azure/cosmos-db/request-units?utm_source=chatgpt.com

Domin M.K., PolupanYu.V.Analysis of Methods for Representing Hierarchical Information in Document-Oriented Databases

The choice of an effective method for representing hierarchical information in databases is an important task in software system design since hierarchical data structures are widely used in various fields, including recommendation systems, supply chain management and analytical solutions. The article analyzes various methods of storing hierarchical structures in document-oriented databases using MongoDB as an example and compares their efficiency.

When working with a small amount of hierarchical data, almost any method will function at an acceptable speed. However, in cases where the system operates with hundreds or even thousands of hierarchies, an incorrect choice of representation method can significantly impact system performance, increase operational costs, and complicate data processing.

As part of the research, the authors analyzed methods for representing hierarchical structures in document-oriented databases, examined their advantages, disadvantages, and performance in real-world usage scenarios.

Document-oriented databases such as MongoDB provide flexible options for storing hierarchical data. In MongoDB, several approaches can be used: the adjacency matrix method, the materialized path method, and the nested sets method.

The article presents the results of performance testing of these methods in two scenarios: using a database installed on a dedicated server and using a cloud database service on Microsoft Azure. The choice of method depends on specific requirements for query speed, update flexibility, and implementation complexity.

The method of storingthe adjacency matrixperformed significantly better than in relational databases and can be used in many scenarios due to its simplicity of implementation. However, if frequent hierarchy queries or partial hierarchy retrievals are required in the software system, the materialized path method is recommended, as it operates much faster. Despite its higher implementation complexity and increased memory consumption, it provides better query performance. The nested sets method does not offer significant advantages for the most common use cases.

This research is useful for developers working on systems that process large volumes of hierarchical information.

Keywords: *document-oriented databases, MondoDB, hierarchical information, performance testing, Microsoft Azure, request units.*

Дьомін Максим Костянтинович – к. т. н., доц., доц. СНУ ім. В. Даля, факультет інформаційних технологій та електроніки, кафедра інформаційних технологій та програмування, maksymdmn@snu.edu.ua.
Полупан Юлія Вікторівна – к. т. н., доц., доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, факультет інформатики та обчислювальної техніки, кафедра інформатики та програмної інженерії, juliy_polupan@i.ua

Стаття подана 10.02.2025.

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-12-20

УДК 621.791.725

ЛАЗЕРНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ВИРОБІВ З ВІССЮ ОБЕРТАННЯ ТИПУ ТРУБА-ШТУЦЕР ВИГОТОВЛЕНИХ З КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Юрченко Ю.В., Сіора О.В., Соколовський М.В., Гардер Д.А., Бернацький А.В.

LASER WELDING OF THIN-WALLED PRODUCTS WITH A ROTATION AXIS OF THE PIPE-NIPPLE TYPE MADE OF CORROSION-RESISTANT HIGH-ALLOY STEELS

Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Harder D.A., Bernatskyi A.V.

Тонкостінні вироби з віссю обертання, виготовлені з різнорідних корозійностійких сталей, зокрема аустенітного та мартенситно-феритного класу, знаходять широке застосування в промисловості. Аустенітні сталі відзначаються високою корозійною стійкістю та механічними характеристиками при підвищених температурах, тоді як мартенситно-феритні сталі демонструють кращу стійкість до корозійного розтріскування та є більш економічною альтернативою для використання у водних середовищах. Зварювання таких різнорідних матеріалів супроводжується складнощами, пов'язаними з відмінностями у фізичних, механічних і металургійних властивостях, що призводить до утворення зон з підвищеними напруженнями та можливими структурними дефектами. Лазерне зварювання забезпечує мінімізацію теплового впливу та дає змогу контролювати структуру зварного з'єднання, однак його застосування для зварювання тонкостінних виробів із різнорідних сталей потребує подальших досліджень. Визначення впливу термічного циклу на властивості зварних з'єднань залишається актуальною проблемою, оскільки невідповідність геометричних параметрів зварного з'єднання може призвести до зниження втомної міцності деталей. У межах дослідження проведено зварювання стикових з'єднань тонкостінних виробів із віссю обертання, виготовлених із сталі 12Х18Н10Т (труба) та сталі 14Х17Н2 (штуцер), із застосуванням Nd:YAG-лазера «DY044» (потужність 4,4 кВт, довжина хвилі 1,06 мкм). Був обраний наступний оптимальний режим зварювання: потужність лазерного випромінювання P = 1 кВт, швидкість зварювання $V_{зв}$ = 600 мм/хв, величина розфокусування лазерного випромінювання ΔF = +2 мм. Для захисту зварного з'єднання були використані два захисні гази: аргон подавався знизу зварюваних деталей із витратою 14 л/хв, а гелій – зверху із витратою 30 л/хв. Визначено, що всі зразки демонструють руйнування в зоні зварного з'єднання під дією вібраційних навантажень у діапазоні напружень 14–28 кгс/мм². Аналіз мікроструктури зламів підтвердив розвиток втомного руйнування, яке починається в зоні зварного з'єднання, а в окремих випадках переходить у тіло труби. Виявлено дефекти геометрії зварного з'єднання, зокрема увігнутість кореня на глибину до 0,2 мм, що перевищує допустимі значення. Також зафіксовано перевищення ширини зварного з'єднання на окремих зразках (до 1,5 мм за нормативу 1–1,1 мм). Металографічні дослідження не виявили дефектів у вигляді пор, раковин чи шлакових включень, а мікроструктура матеріалу деталей оцінена як задовільна. Твердість матеріалу штуцерів становить HRC31, що відповідає технічним вимогам. Перегрів зони зварювання та високі внутрішні напруження під час зварювання визначено як ключові фактори, що сприяють виникненню тріщин. Для усунення виявлених дефектів рекомендовано оптимізацію параметрів лазерного зварювання, зокрема потужності випромінювання та швидкості зварювання. Крім того, запропоновано заходи для зменшення ймовірності утворення гарячих тріщин, зокрема подрібнення зерна шляхом введення мікролегуючих елементів (Ti, B), використання додаткового сканування лазерного випромінювання або ультразвукової вібрації під час зварювання.

Ключові слова: *лазерне зварювання, тонкостінні вироби, різнорідні сталі, деталі з віссю обертання, проблеми, дефекти.*

Вступ. Тонкостінні вироби з віссю обертання з різнорідних корозійностійких сталей, в тому числі сталями мартенситно-феритні та аустенітного класу, широко застосовуються в промисловості. Аустенітні корозійностійкі сталі широко застосовуються в хімічній, нафтохімічній, тепловій та атомній промисловості завдяки їхній високій стійкості до корозії та відмінним механічним

властивостям при високих температурах [1–2]. Мартенситно-феритні корозійностійкі сталі мають кращу стійкість до корозійного розтріскування під напруженням, ніж аустенітні, і є більш економічною альтернативою у водних середовищах, де є ризик появи корозії. Завдяки високій теплопровідності та низькому коефіцієнту теплового розширення мартенситно-феритні сталі особливо ефективні для використання в трубах і облицюванні теплообмінників [3–4]. Зварювання різнорідних сталей, таких як аустенітні та феритні, вимагає врахування відмінностей у їхніх фізичних, механічних і металургійних властивостях [5]. У зоні зварного з’єднання формується перехідна область, де можуть виникати небажані структурні зміни, зокрема утворення твердих фаз або крихких інтерметалідів. Це пов'язано з підвищеним вмістом хрому та нікелю в аустенітній сталі, що впливає на корозійну стійкість і міцність з’єднання [6]. Крім того, різниця у теплопровідності та тепловому розширенні між мартенситно-феритними та аустенітними сталями може призвести до напружень і деформацій у зоні зварного з’єднання [7]. Такі методи зварювання, як TIG, лазерне, електронно-променеве, плазмове, дозволяють знизити тепловий вплив на зону зварювання та забезпечити кращий контроль властивостей матеріалу [8–11]. Також важливо уникати утворення великих зерен у мартенситно-феритних сталях, що може погіршувати механічні властивості зварного з’єднання [12].

На даний момент лазерне зварювання в Україні починає все більше впроваджуватися на різних виробництвах. Однак, існує проблема його впровадження через недостатню визначеність оптимальних термічних циклів процесу і їх впливу на структуру і властивості зварних з'єднань та ЗТВ під час зварювання.

При цьому, незважаючи на такі переваги лазерного зварювання, як: не вимагає складних вакуумних камер, забезпечує найбільш локалізований термічний вплив, має малі розміри зони термічного впливу та мінімальні залишкові деформації, все ще є ряд завдань які потребують вирішення. До одного з завдань можна віднести формування необхідної мікроструктури зварного з’єднання з різнорідних корозійностійких сталей. У статті [13] розглянуто особливості зварювання різнорідних сталей, зокрема аустенітних (AISI 304) і феритних (AISI 430) сталей. Автори зазначають, що аустенітна сталь має нижчу теплопровідність (приблизно 16–20 Вт/м·К) порівняно з феритною (близько 25–30 Вт/м·К), що призводить до різної поведінки цих сталей під час зварювання. У феритних сталях, завдяки більшій теплопровідності, тепло розповсюджується в напрямку, перпендикулярному до зварного з’єднання, що сприяє росту стовпчастих зерен, в той час як у аустенітних сталях утворюються рівновісні зерна. Стовпчасті зерна, характерні для феритної сталі, є результатом епітаксіального зростання, яке також спостерігається в інших зварних з'єднаннях різнорідних металів.

В свою чергу від мікроструктури зварного з’єднання залежать такі параметри як мікротвердість, механічні і корозійні властивості, схильність до утворення кристалізаційних тріщин.

У статті [14] досліджено корозійну стійкість зварних з'єднань різнорідних сталей феритного (AISI 430) та аустенітного (AISI 304) класу в 3,5% розчині NaCl при кімнатній температурі за допомогою потенціодинамічних поляризаційних кривих та електрохімічної імпедансної спектроскопії. В результаті досліджень були виявлені основні фактори, що впливають на корозійну стійкість зварних з'єднань, які включають хімічний склад (вміст Cr і Ni), співвідношення фаз фериту та мартенситу, а також частка границь фаз. Збільшення вмісту мартенситу призводить до зниження корозійної стійкості через утворення дефіцитних зон хрому, які служать осередками розвитку корозії. Крім того, більш високий вміст хрому в феритних фазах сприяє утворенню захисних пасивуючих плівок і покращує корозійну стійкість.

В дослідженні [15] було виявлено сильну періодичність утворення тріщин на рентгенівських знімках і сигналі коливання каналу проплавлення (так званий «keyhole») – обидва з однаковою частотою. Отже, існує взаємна взаємодія між енергією, що вводиться в канал проплавлення, утвореними при цьому вихорами потоку розплаву, зміною геометрії зварювальної ванни, що впливає на величину термоіндукованих напружень і деформацій та, як наслідок, на утворення кристалізаційних тріщин.

У результаті проведених досліджень [16] було встановлено, що параметри лазерного зварювання значно впливають на механічні властивості зварних з'єднань між феритними (AISI 420) та аустенітними (AISI 304) сталями. Зокрема, збільшення швидкості зварювання

призводить до зменшення розміру зони плавлення, що в свою чергу може спричинити утворення пористості та підвищення зернистості в зоні термічного впливу і зоні плавлення. Це негативно позначається на міцності з'єднання, оскільки зростає ймовірність утворення тріщин і зниження міцності зварного з'єднання, особливо у феритних сталях. Найвищу міцність і подовження продемонстрували зразки, виготовлені при низькій швидкості зварювання і високій енергії імпульсу, що сприяло зменшенню утворення пористості та більш стабільній мікроструктурі зварного з'єднання. Крім того, було виявлено, що тріщини зазвичай виникають у феритному зразку та в ЗТВ феритної сталі, де спостерігається більш груба мікроструктура фериту.

В дослідженні [17] було виявлено збільшення твердості обох основних сталей у напрямку до зони термічного впливу та зменшення її значення в зоні плавлення. Цей ефект є реакцією основних металів з присадним матеріалом, тобто AISI 304 і AISI 316, які є сплавами, багатими на хром, що призводить до стабілізації та осадження дельта-фериту, який затримується на границі зерен, залучаючи зерна аустеніту і підвищуючи твердість розплавленої зони. Значення твердості, що спостерігаються між цими областями, виникають через існуючі градієнти хімічного складу, оскільки в цій області відбувається часткове змішування між легуючими елементами під час затвердіння. Високі піки твердості в основному формуються в зоні термічного впливу.

Як видно з аналізу сучасних наукових робіт, вдосконалення технологічних підходів до лазерного зварювання тонкостінних виробів з віссю обертання виготовлених з різнорідних корозійностійких сталей є актуальним завданням для України в контексті сучасних проблем прикладного матеріалознавства та обробки матеріалів.

Метою роботи є дослідження втомної міцності при вібраційних навантаженнях, визначення характеру руйнування та мікротвердості тонкостінних стикових зварних з'єднань деталей з віссю обертання виготовлених з різнорідних високолегованих корозійностійких сталей, одержаних лазерним зварюванням.

Виклад основного матеріалу дослідження. Виконували зварювання стикових з'єднань деталей з віссю обертання. Деталі, що зварювалися, являли собою трубу діаметром 22 мм з товщиною стінки 1 мм та штуцер. Схема лазерного зварювання стикового з'єднання показана на рисунку 1.

Для виготовлення двох деталей, що зварювалися (труби та штуцера), використовували сталь 12Х18Н10Т для труби та сталь 14Х17Н2 для штуцера. Сталь 12Х18Н10Т – корозійностійка високолегована хромонікелетитанова аустенітна сталь, яка набула найбільшого поширення в промисловості через можливість успішного використання її в різноманітних експлуатаційних умовах. Вона має високу корозійну стійкість у низці рідких середовищ, стійка проти міжкристалітної корозії після зварювального нагріву, порівняно мало окрихчується в результаті тривалого впливу високих температур і може бути застосована як жароміцний матеріал за температур ~600° С.

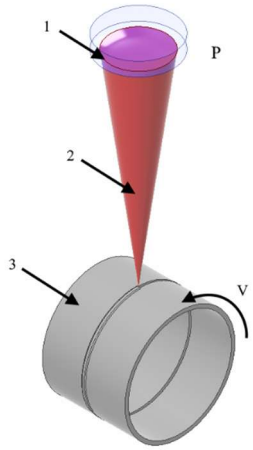


Рис. 1. Схема лазерного зварювання:
1 – лінза, 2 – лазерне випромінювання,
3 –деталі, що зварювалися

Сталь 14Х17Н2 – корозійностійка мартенситно-феритна сталь. Має високу міцність (700–850 МПа), зносостійкість і стійкість до корозії в агресивних середовищах (кислоти, луги, морська вода). Використовується в хімічній, харчовій промисловості, машинобудуванні (насоси, вали, підшипники), а також у декоративних конструкціях.

Хімічний склад сталей (масова частка елементів (макс.), %), згідно ГОСТ 5632 – 72:

12Х18Н10Т(AISI 321): C 0,12; Si 0,8; Mn 0,8; Ni 0,02; S 0,02; P 0,035; Cr 17- 19; Cu 0,3; Ti 0,015; Fe осн..

14Х17Н2(AISI 431): C 0,11-0,17; Si 0,8; Mn 0,8; Ni 1,5-2,5; S 0,025; P 0,03; Cr 16- 18; Cu 0,3; Ti 0,2; Fe осн..

У експериментах був використаний Nd:YAG-лазер «DY044» з потужністю випромінювання до 4,4 кВт та довжиною хвилі випромінювання λ=1,06 мкм, виробництва фірми «Rofin-Sinar» (виробництва Німеччини).

Перед початком експериментів було обрано оптимальний режим зварювання: потужність лазерного випромінювання P = 1 кВт, швидкість зварювання $V_{зв}$ = 600 мм/хв (9 об/хв), величина розфокусування лазерного випромінювання ΔF = +2 мм. В якості захисного газу було обрано 2 гази, аргон та гелій, які подавалися знизу та зверху зварюваних деталей відповідно. Витрата газу при цьому становила для аргону 14 л/хв, для гелію – 30 л/хв.

Після зварювання зразки були випробувані на опір втомній міцності при вібраційних навантаженнях комбінованим методом. Для цього зразки препарувалися дротовими терморезисторами типу 5ПЗ з базою 5 мм, згідно схеми препарування представленої на рисунку 2.

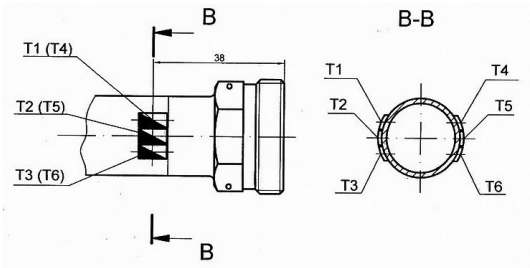


Рис. 2. Схема препарування зразків, закінцівка штуцер

Для попередньої оцінки рівнів меж витривалості перша закінцівка партії випробовувалася методом ступеневого підвищення напружень до руйнування. Під час попереднього випробування методом ступеневого підвищення напружень до руйнування ступінь підвищення напружень становила до Δσ = 2 кгс/мм^2, а також початкові рівні навантаження призначалися індивідуально.

Для остаточного визначення меж витривалості зразків для ймовірності неруйнування P = 0,95 випробування продовжувалися стандартним методом «на рівнях». Згідно з вимогами збірки зусилля затиснення для закінцівок становило 6 кгс/м. Випробування проводилися в умовах кімнатної температури під час згинальних коливань за основним тоном із симетричним циклом навантаження за базового числа циклів $N_б = 10^7$.

Після проведення випробувань на втомну міцність всі зразки були направлені на металографічні дослідження. Аналіз будови зламів розкритих тріщин проводили за допомогою бінокулярного мікроскопа при збільшенні ×25. Мікроструктура була досліджена за допомогою оптичного мікроскопа OLYMPUS IX70 при збільшеннях ×50... ×100.

За результатами досліджень втомної міцності при вібраційних навантаженнях з різними рівнями напружень від 14 до 28 кгс/мм^2 були отримані наступні результати (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри та результати випробувань зразків

№	σ, кгс/мм^2	*f*, Гц	N, циклів	Результат
1	22	165	$3{,}96\times10^5$	руйнування
2	18	166	$8{,}76\times10^5$	руйнування
3	20	166	$2{,}24\times10^6$	руйнування
4	14, 16, 18, 20, 22, 26	167	10^7 $3{,}9\times10^6$	без руйнування руйнування
5	18, 22, 24, 26, 28	165	10^7 $8{,}91\times10^5$	без руйнування руйнування

Під час візуального огляду виявлено, що руйнування всіх зразків відбулося по зварному з'єднання (табл. 2). При цьому на зразках №№1, 3 тріщина поширюється через зону зварювання. На зразку №5 розвиток тріщини зі зварного з'єднання переходить у тіло труби. Довжина тріщин становить: на зразку №1 – ~45мм; на зразках №№2, 4 – ~30мм; №3, 5 – ~25мм. (табл.2).

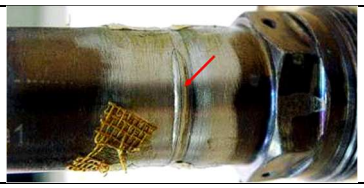
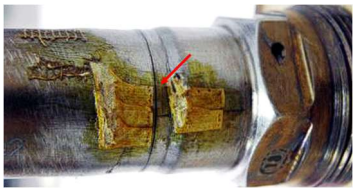
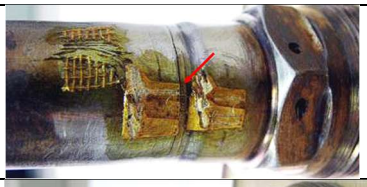
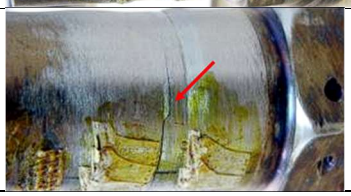
Під час аналізу будови зламів розкритих тріщин встановлено, що руйнування всіх зразків втомного характеру, з початком розвитку від лінійних осередків, розташованих в їх внутрішній поверхні, в зоні зварного з'єднання (табл. 3). Початок розвитку тріщин на зразках №№1, 2, 3, 4 походить від лінійних осередків, розташованих біля їхньої внутрішньої поверхні, в зоні зварного з'єднання. На зразку №5 виявлено двосторонній розвиток тріщини: довжиною ~12мм відзначається розвиток втоми від лінійних осередків біля внутрішньої поверхні за зварним з'єднанням, потім на ~13мм за матеріалом труби з початком від лінійних осередків біля зовнішньої поверхні зразка.

Для підтвердження місця руйнування (по зварному з'єднанню або основному матеріалу деталей), було виконано мікроскопічний аналіз

у поперечному перерізі зварних з'єднань, у зонах, що перетинають осередки в зламах.

Таблиця 2

Результати візуального огляду зразків

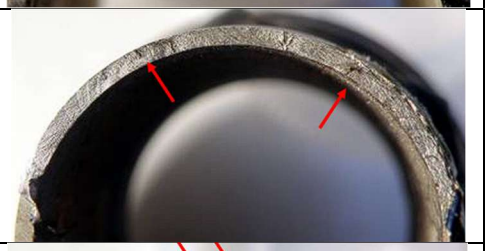
№	Руйнування	Довжина тріщини, мм
1		~45
2		~30
3		~25
4		~30
5		~25

При цьому встановлено, що руйнування що зразки №№1, 2, 3, 4 зруйнувалися безпосередньо по зварному з'єднанню. У зв'язку з цим, перевірити геометричні параметри зварного з'єднання в зоні руйнування на відповідність вимогам не було можливим. Дослідження мікроструктури зламів розкритих тріщин показало, що дефекти зварювання відсутні.

Контроль якості зварювання зразків проводився в місцях, де збереглася геометрія зварних з'єднань (у зонах, протилежних тріщинам). Металографічним контролем перевірено розміри зварних з'єднань, а також наявність (відсутність) внутрішніх дефектів у матеріалі стикових з'єднань на відповідність технічним вимогам до таких з'єднань. При цьому встановлено, що в корені зварного з'єднання всіх зразків є увігнутість глибиною до 0,2 мм, що перевищує 5% товщини металу, що зварюється (1 мм), і є неприпустимим згідно технічних вимог до таких з'єднань (рис. 3, б). Ця увігнутість має місце практично по всій протяжності зварних з'єднаннь, що також є неприпустимим відхиленням (згідно технічних вимог до таких з'єднань – не більше 20%). У мікроструктурі зразка №1 виявлена тріщина, яка поширюється від зовнішньої поверхні штуцера в зварне з'єднання на глибину 0,27 мм (рис. 3, а). Ширина зварного з'єднання на зразку №5 перевищує допустиму і становить 1,5 мм при вимогах d_c = 1…1,1 мм (рис. 3, в).

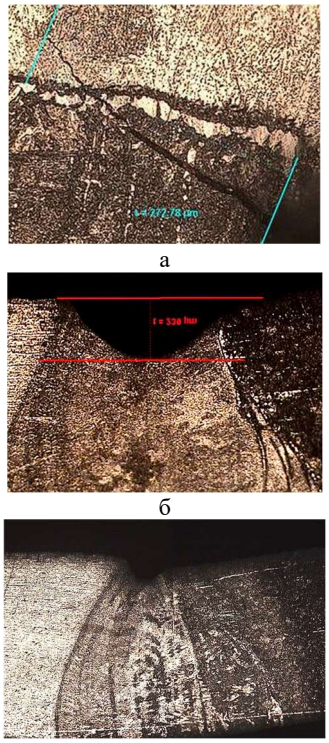
Таблиця 3

Зовнішній вигляд зламів розкритих тріщин зразків

№	Злами розкритих тріщин
1	
2	
3	
4	
5	

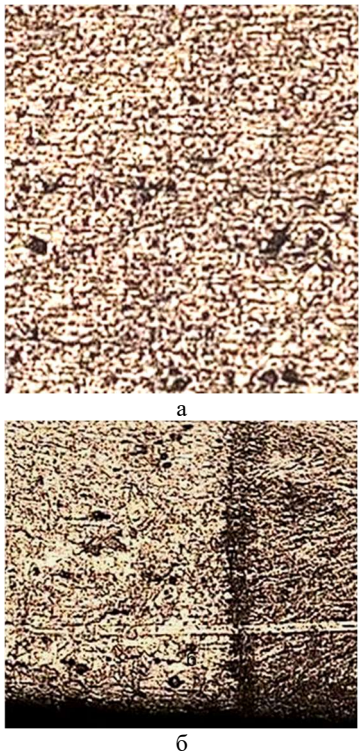
Дефекти зварних з'єднань у вигляді пор, раковин, шлакових та інших включень, не виявлено. Величина зерна матеріалу труби відповідає 10-му балу за ГОСТ 5639-82 як біля

зварного з'єднання, так і в основному матеріалі (рис. 4). При цьому мікроструктура основного матеріалу труб і штуцерів задовільна.



а б в

Рис. 3. Дефекти деяких зварних з'єднань зразків: а – №1, б – №2, в – №5



а б

Рис. 4. Розмір зерна в мікроструктурі матеріалу труби: а – зона основного матеріалу; б – зона біля зварного з'єднання

Також була виміряна твердість матеріалу штуцерів, вона склала HRC31 за вимоги HRC 28...35, що є задовільним показником.

Основною причиною руйнування зразків під впливом вібраційних навантажень із рівнями напружень 14–28 кгс/мм² визначено недоліки геометрії зварних з'єднань, які суттєво знижують їхню втомну міцність. Усі зразки продемонстрували руйнування у вигляді тріщин втомного характеру, початок яких зафіксовано в зонах увігнутості кореня зварного з'єднання глибиною до 0,2 мм, що перевищує допустимі 5% товщини металу (1 мм). Увігнутість кореня виявлено по всій протяжності зварних з'єднань, що значно перевищує нормативно дозволені 20% довжини та не відповідає технічним вимогам до таких з'єднань. На зразках №1–4 руйнування відбулося по зварному з'єднанню, тоді як на зразку №5 відбувся двосторонній розвиток тріщини, вона перейшла зі зварного з'єднання в тіло труби, що вказує на складний характер руйнування. Металографічний аналіз підтвердив невідповідність ширини зварного з'єднання технічним вимогам на окремих зразках. Так, на зразку №5 ширина становила 1,5 мм за нормативного значення 1–1,1 мм, що вказує на недостатній контроль процесу лазерного зварювання. Під час мікроструктурних досліджень дефекти у вигляді пор, раковин чи шлакових включень не виявлено. Величина зерна матеріалу труб відповідає 10-му балу за ГОСТ 5639-82, що вважається задовільним показником. Твердість матеріалу штуцерів склала HRC31, що відповідає технічним вимогам (HRC 28–35). На зразку №1 виявлено тріщину, яка поширюється від зовнішньої поверхні штуцера в зварне з'єднання на глибину 0,27 мм, що, ймовірно, пов'язано з високими внутрішніми напруженнями, які виникли під час зварювання.

Для усунення вищеперелічених дефектів зварного з'єднання, багатьма дослідниками вже були прийняті міри, щодо можливості їх усунення. В роботі [18] досліджено утворення такого дефекту, як увігнутість кореня зварного з'єднання. Виявилося, що цей дефект спричинений усадкою більшої зварювальної ванни через надлишкову вхідну потужність лазерного випромінювання у напрямку товщини зварного з'єднання. Для усунення такого дефекту, як автори рекомендують контролювати формування області випаровування зварюваного металу, шляхом оптимізації робочих параметрів, таких як потужність

лазерного випромінювання та швидкість зварювання.

Перевищення допустимого розміру литої зони спричинене збільшенням енергії лазерного випромінювання, при цьому конвекція Марангоні, зумовлена поверхневим натягом, стає сильнішою, що значно прискорює потік металу розширюючи зварювальну ванну [19]. Автори дослідження також рекомендують оптимізувати потужність і швидкість зварювання для усунення даного дефекту.

Усунення такого дефекту, як утворення гарячих тріщин можна досягти шляхом подрібнення зерна, за допомогою додавання таких елементів як титан і бор, додаткове сканування лазерного випромінювання при зварюванні, вібрація зварюваного зразка за допомогою ультразвукових коливань, а також оптимізації параметрів лазерного зварювання [20].

Висновки. Недоліки геометрії зварних з'єднань, такі як увігнутість кореня зварного з'єднання глибиною до 0,2 мм (що перевищує допустимі 0,05 мм), та перевищення нормативної ширини зварного з'єднання до 1,5 мм за допустимого значення 1–1,1 мм, визначено ключовими факторами, що знижують втомну міцність зварних з'єднань за циклічних навантажень 14–28 кгс/мм². Зональне поширення тріщин втомного характеру свідчить про концентрацію напружень у місцях увігнутості зварного з'єднання. Відсутність дефектів, таких як пори чи шлакові включення, підтверджує, що геометрія зварних з'єднань є основним фактором руйнування, а не якість зварного матеріалу. Встановлено, що наявність значної увігнутості по всій довжині зварного з'єднання (більше 20% дозволеної протяжності) є критичним відхиленням.

З огляду на отримані результати, подальші дослідження доцільно зосередити на оптимізації параметрів лазерного зварювання, а також розробці нового технологічного оснащення для точного складання зварюваних кромок зварюваних деталей з віссю обертання. Ці кроки повинні підвищити якість зварних з'єднань та усунути дефекти зварних з'єднань які представлені в даному дослідженні.

Література

1. George, G., & Shaikh, H. Introduction to Austenitic stainless steels. In *Elsevier eBooks* 2002. Pp. 1–36. https://doi.org/10.1533/9780857094018.37
2. Sridhar, N., Thodla, R., Gui, F., Cao, L., & Anderko, A. Corrosion-resistant alloy testing and selection for oil and gas production. *Corrosion Engineering Science and Technology the International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control*, *53*(sup1), 2017. 75–89. https://doi.org/10.1080/1478422x.2017.1384609
3. Cashell, K., & Baddoo, N. (2014). Ferritic stainless steels in structural applications. *Thin-Walled Structures*, *83*, 169–181. https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.03.014
4. Faes, W., Lecompte, S., Ahmed, Z. Y., Van Bael, J., Salenbien, R., Verbeken, K., & De Paepe, M. Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers. *Corrosion Reviews*, 2019. *37*(2), 131–155. https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0054
5. Giudice, F., Missori, S., Scolaro, C., & Sili, A. A review on fusion welding of dissimilar Ferritic/Austenitic Steels: Processing and weld zone Metallurgy. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024. *8*(3), 96. https://doi.org/10.3390/jmmp8030096
6. Shen, Z., Zhang, J., Wu, S., Luo, X., Jenkins, B. M., Moody, M. P., Lozano-Perez, S., & Zeng, X. Microstructure understanding of high Cr-Ni austenitic steel corrosion in high-temperature steam. *Acta Materialia*, 2022. *226*, 117634. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117634
7. Li, S., Li, J., Sun, G., & Deng, D. Modeling of welding residual stress in a dissimilar metal butt-welded joint between P92 ferritic steel and SUS304 austenitic stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023. *23*, 4938–4954. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.123
8. Kurc-Lisiecka, A., & Lisiecki, A. Laser welding of stainless steel. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering,* 2020. *1(*98), 2–40. https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.0815
9. Sokkalingam, R., Mastanaiah, P., Muthupandi, V., Sivaprasad, K., & Prashanth, K. G. Electron-beam welding of high-entropy alloy and stainless steel: microstructure and mechanical properties. *Materials and Manufacturing Processes,* 2020. *35*(16), 1885–1894. https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1802045
10. Guo, N., Hu, H., Tang, X., Ma, X., & Wang, X. The effect of TIG welding heat input on the deformation of a thin bending plate and its weld zone. *Coatings,* 2023. *13*(12), 2008. https://doi.org/10.3390/coatings13122008
11. Haldar, V., Biswal, S. K., & Pal, S. Formability study of micro- plasma arc-welded AISI 316L stainless steel thin sheet joint. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,* 2022. *44*(11). https://doi.org/10.1007/s40430-022-03871-7
12. Khattak, M. A., Zaman, S., Tamin, M. N., Badshah, S., Mushtaq, S., & Omran, A. A. B. Effect of welding

phenomenon on the microstructure and mechanical properties of ferritic stainless steel-A review. *Journal of Advanced Research in Materials Science*, 2017. *32*(1), 13-31.
13. Reddy, G. M., Mohandas, T., Rao, A. S., & Satyanarayana, V. V. Influence of welding processes on microstructure and mechanical properties of dissimilar austenitic-ferritic stainless steel welds. *Materials and Manufacturing Processes*, 2005. *20*(2), 147–173. https://doi.org/10.1081/amp-200041844
14. Wang, C., Yu, Y., Yu, J., Zhang, Y., Zhao, Y., & Yuan, Q. Microstructure evolution and corrosion behavior of dissimilar 304/430 stainless steel welded joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019. *50*, 183–191. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.015
15. Schaefer, M., Kessler, S., Scheible, P., Speker, N., & Harrer, T. Hot cracking during laser welding of steel: influence of the welding parameters and prevention of cracks. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*, 2017. *10097*, 100970E. https://doi.org/10.1117/12.2254424
16. Geng, Y., Akbari, M., Karimipour, A., Karimi, A., Soleimani, A., & Afrand, M. Effects of the laser parameters on the mechanical properties and microstructure of weld joint in dissimilar pulsed laser welding of AISI 304 and AISI 420. *Infrared Physics & Technology*, 2019b. *103*, 103081. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103081
17. De Oliveira, M. J. C., Conceição, J. G. L., Diniz, M. N., Da Cruz, D. L., Da Silva Moreira, C. E., De Souza Nascimento, M. V., De Mattos, F. N., & Ramos, R. Effect of welding parameters on the microstructure and mechanical behavior of dissimilar AISI 304/AISI 430 thin plates welded by gas Tungsten arc welding. *Observatório de la economía latinoamericana*, 2023. *21*(9), 10640–10656. https://doi.org/10.55905/oelv21n9-010
18. Jayanthi, A., Venkatramanan, K., & Kumar, K. S. An investigation on laser induced downward expanded vapour region in laser weld butt joint of AISI 316L stainless steel. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, *574*(1), 2019. 012020. https://doi.org/10.1088/1757-899x/574/1/012020
19. Liu, S., Mi, G., Yan, F., Wang, C., & Jiang, P. Correlation of high power laser welding parameters with real weld geometry and microstructure. *Optics & Laser Technology*, 2017. *94*, 59–67. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.03.004
20. Norouzian, M., Elahi, M. A., & Plapper, P. A review: Suppression of the solidification cracks in the laser welding process by controlling the grain structure and chemical compositions. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2023. *7*, 100139. https://doi.org/10.1016/j.jajp.2023.100139

Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Harder D.A., Bernatskyi A.V. Laser welding of thin-walled products with a rotation axis of the pipe-nipple type made of corrosion-resistant high-alloy steels

Thin-walled products with a rotational axis made of different corrosion-resistant steels, including austenitic and martensitic-ferritic steels, are widely used in industry. Austenitic steels are characterized by high corrosion resistance and mechanical properties at elevated temperatures, while martensitic-ferritic steels demonstrate better resistance to corrosion cracking and are a more economical alternative for use in aqueous environments. Welding of such heterogeneous materials is accompanied by difficulties associated with differences in physical, mechanical and metallurgical properties, which leads to the formation of areas with increased stresses and possible structural defects. Laser welding minimizes the thermal impact and allows controlling the structure of the welded joint, but its application for welding thin-walled products made of dissimilar steels requires further research. Determining the effect of the thermal cycle on the properties of welded joints remains an urgent problem, since a mismatch in the geometric parameters of the welded joint can lead to a decrease in the fatigue strength of parts. As part of the study, butt welds of thin-walled products with a rotation axis made of AISI 321 steel (pipe) and AISI 431 steel (fitting) were performed using a DY044 Nd:YAG laser (power 4.4 kW, wavelength 1.06 μm). The following optimal welding mode was chosen: laser power P = 1 kW, welding speed Vw = 600 mm/min, laser defocusing value ΔF = +2 mm. To protect the welded joint, two shielding gases were used: argon was supplied from below the welded parts at a flow rate of 14 l/min, and helium was supplied from above at a flow rate of 30 l/min. It was determined that all samples demonstrate fracture in the welded joint zone under the influence of vibration loads in the stress range of 14-28 kgf/mm². The analysis of the fracture microstructure confirmed the development of fatigue fracture, which begins in the welded joint zone and, in some cases, moves to the pipe body. Defects in the geometry of the welded joint were detected, in particular, the concavity of the root to a depth of 0.2 mm, which exceeds the permissible values. The width of the welded joint was also found to be excessive in some samples (up to 1.5 mm, while the standard is 1-1.1 mm). Metallographic tests did not reveal any defects in the form of pores, shells or slag inclusions, and the microstructure of the material of the parts was assessed as satisfactory. The material hardness of the fittings is HRC31, which meets the technical requirements. Overheating of the welding zone and high internal stresses during welding were identified as key factors contributing to the cracking. To eliminate the detected defects, it is recommended to optimize the laser welding parameters, in particular, the radiation power and welding speed. In addition, measures are proposed to reduce the likelihood of hot crack formation, such as grain refinement by introducing microalloying elements

(Ti, B), using additional laser scanning or ultrasonic vibration during welding.

Keywords: *laser welding, thin-walled products, dissimilar steels, parts with a rotation axis, problems, defects.*

Юрченко Юрій Вікторович – аспірант, провідний інженер відділу №77 «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (м. Київ) yuriyyurchenko14@gmail.com

Сіора Олександр Васильович – науковий співробітник відділу №77 «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (м. Київ) siora_ov@ukr.net

Соколовський Микола Володимирович – аспірант, провідний інженер відділу №77 «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (м. Київ) m_sokolovskyi@paton.kiev.ua

Гардер Дмитро Андрійович – к.т.н., науковий співробітник відділу №77 «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (м. Київ) laser-77@online.ua

Бернацький Артемій Володимирович – к.т.н., старший дослідник., зав. відділу №77 «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (м. Київ) bernatskyi@paton.kiev.ua

Стаття подана 26.01.25

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-21-29

УДК 622.2

ОЦІНКА ВПЛИВУ BIM-ТЕХНОЛОГІЙ НА КУРС РОЗВИТКУ НАФТОГАЗОВОЇ ІНДУСТРІЇ

Данилюк Н.Я., Чеверда А.М.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF BIM TECHNOLOGIES ON THE DEVELOPMENT COURSE OF THE OIL AND GAS INDUSTRY

Danyliuk N.Y., Cheverda A.M.

Дана наукова стаття проводить всебічний аналіз впливу технологій будівельно-інформаційного моделювання (BIM) на сучасний курс розвитку нафтогазової індустрії, розкриваючи значення впровадження цих технологій у різні аспекти галузі. У статті розглядаються як поточні, так і перспективні виклики, з якими стикається нафтогазова індустрія в умовах постійного зростання складності проєктів та суворих вимог до ефективності й екологічної сталості. Особливу увагу приділено аналізу впливу BIM на всі етапи життєвого циклу проєктів, починаючи від концептуального проєктування та планування до будівництва, експлуатації та подальшого керування об'єктами. В рамках дослідження розкрито, як цифрові технології сприяють підвищенню точності прогнозування, оптимізації ресурсів, скороченню витрат і зменшенню ризиків під час реалізації проєктів у нафтогазовому секторі. Також досліджуються питання інтеграції BIM із традиційними процесами керування проєктами та об'єктами в галузі, а також їхній потенціал для досягнення більш сталого та ефективного функціонування індустрії. Додатково розглянуто вплив використання BIM на підвищення рівня безпеки праці, контроль за технічним станом об'єктів та їхню відповідність екологічним нормам, що набуває особливої важливості в умовах сучасного глобального порядку денного. Окремий розділ присвячено аналізу потенційних перешкод на шляху до впровадження BIM, включаючи технологічні, організаційні та фінансові бар'єри, та розгляду шляхів їх подолання через адаптацію бізнес-процесів та підвищення кваліфікації персоналу. Виявлено, що ключовими викликами є висока вартість впровадження нових технологій, необхідність змін у корпоративній культурі підприємств та інтеграція BIM із наявними цифровими платформами. Водночас дослідження підкреслює важливість стратегічного підходу до впровадження BIM, який має включати створення нормативно-правової бази, розвиток освітніх програм для спеціалістів галузі та впровадження системи безперервного моніторингу ефективності впроваджених рішень. Стаття надає детальні рекомендації щодо стратегічного впровадження BIM у нафтогазову галузь, враховуючи швидкий розвиток технологій і зміни в нормативно-правовій базі. Висвітлено також можливі шляхи розвитку цієї технології у майбутньому, її роль у забезпеченні стійкості та ефективності нафтогазових проєктів, а також у формуванні більш прозорого та інтегрованого підходу до керування нафтогазовими активами. Окремо розглянуто перспективи застосування BIM у поєднанні з іншими передовими технологіями, такими як штучний інтелект, Інтернет речей (IoT) та великі дані, що дозволяє створювати цифрові двійники об'єктів і прогнозувати їхню експлуатаційну ефективність у режимі реального часу. У кінцевому результаті, стаття пропонує бачення майбутнього нафтогазової індустрії в умовах активного застосування BIM-технологій, що дозволяє розширити межі можливого для цієї критично важливої галузі. Результати дослідження можуть бути корисними для науковців, інженерів, керівників підприємств та державних організацій, які займаються розробкою стратегій розвитку нафтогазового сектору та прагнуть підвищити його ефективність і конкурентоспроможність на глобальному рівні.

Ключові слова: *BIM-технології, курс розвитку нафтогазової індустрії, керування відомостями, вплив технологій, цифрова трансформація, інновації, оптимізація.*

Вступ. Сучасна нафтогазова індустрія, будучи ключовою галуззю світової економіки, постійно стикається з викликами та завданнями, пов'язаними з ефективністю, безпекою та сталістю розвитку. Однак, у зв'язку із стрімким технологічним розвитком, нафтогазовий сектор має унікальну можливість використовувати інноваційні технології для покращення своєї продуктивності та динаміки розвитку, що має визначний вплив на його розвиток.

Мета та завдання статті. Мета статті полягає в оцінці впливу технологій Building Information Modeling (BIM) на курс розвитку нафтогазової індустрії. Стаття спрямована на аналітичний огляд сучасного стану нафтогазового сектора, вивчення концепцій та принципів BIM-технологій, оцінці практичних впливів та їх впровадження на різних етапах життєвого циклу проєктів, а також визначення перспектив та рекомендацій для оптимального використання BIM в даній галузі. Ця стаття спрямована на надання глибокого розуміння взаємозв'язку між технологічними інноваціями та розвитком нафтогазового комплексу, а також на формулювання практичних рекомендацій для впровадження BIM-технологій у нафтогазовій індустрії з метою підвищення її продуктивності та сталості, на ретельний аналіз впливу BIM-технологій на нафтогазову індустрію та визначення ключових проблем, що виникають у процесі їх впровадження. Основні аспекти дослідження включають в себе визначення оптимальних стратегій впровадження BIM, визначення викликів, пов'язаних з технічними та культурними перешкодами, а також розробку інноваційних рішень для оптимізації всього життєвого циклу проєктів в нафтогазовій галузі.

Головним завданням є створення комплексного огляду та висновків щодо впливу BIM-технологій на стратегії та розвиток нафтогазової індустрії, а також у наданні практичних рекомендацій для ефективного впровадження та використання таких технологій.

Аналіз досліджень і публікацій. На сьогоднішній день інформації на українських ресурсах про застосування BIM-технологій у нафтогазовій індустрії є доволі мало, тому доводиться звертатися до англомовних ресурсів, де інформації стосовно цієї технології є набагато більше.

Проглянувши значну частину наукових статей та літератури, зокрема публікацій у відомих соцмережах для роботи, а також на сайтах світових провідних компаній у нафтогазовій галузі, можна дійти висновку, що такі технології все більше та більше інтегровуються у діяльність таких компаній.

Для прикладу, ось що говорить один з старших керівників проекту та планування відомої нафтогазової компанії : «BIM represents a paradigm shift, transforming how the oil and gas industry designs, builds, operates, and maintains assets. Embracing BIM can elevate efficiency, quality, sustainability, and competitiveness in the global market.» (Engr. George ÑWÒGU, LinkedIn), «BIM являє собою зміну парадигми, трансформуючи те, як нафтогазова промисловість проектує, будує, експлуатує та обслуговує активи. Використання BIM може підвищити ефективність, якість, стійкість і конкурентоспроможність на світовому ринку.» (Інж. Джордж Нвогу, ЛінкедІн) - перекладено на українську [1].

Ще одним підтвердженням цього є пряма цитата, взята з сайту компанії Diasphere – “ Building Information Modeling (BIM) has paved a revolutionary pathway in the Oil and Gas industry, encapsulating an array of benefits ranging from enhanced accuracy in drawings to a collaborative work environment. The seamless integration of reality capture processes like 3D laser scanning with BIM has further propelled the accuracy and efficiency in developing as-built documentation for both onshore and offshore facilities.”, “Інформаційне моделювання будівель (BIM) проклало революційний шлях у нафтовій і газовій промисловості, охоплюючи низку переваг, починаючи від підвищеної точності креслень і закінчуючи робочим середовищем для спільної роботи [2]. Повна інтеграція процесів захоплення реальності, таких як 3D-лазерне сканування з BIM, ще більше підвищила точність і ефективність розробки документації як для наземних, так і для морських об’єктів.” – перекладено на українську мову.

Фактично, з цього стає зрозумілим той факт, що на заході значними кроками BIM-технології починають інтегровуватися у роботу нафтогазових компаній, і, що головне, на це є доволі великий попит.

Виклад основного матеріалу. Нафтогазова індустрія в сучасному світі стикається з необхідністю адаптації до стрімких змін технологічного ландшафту. В цьому контексті, впровадження технологій будівельно-інформаційного моделювання (BIM) представляє значущий потенціал для оптимізації та покращення всього циклу розвитку проєктів у галузі. Однак, при

величезному обсязі можливостей, виникають комплексні виклики, такі як визначення оптимальних стратегій впровадження, забезпечення інтеграції з існуючими системами та ефективне керування великим обсягом даних.

Будівельно-інформаційне моделювання (BIM) використовується в нафтогазовій індустрії для оптимізації процесів у всьому життєвому циклі проектів, включаючи проєктування, будівництво, експлуатацію та керування активами. Ось деякі ключові аспекти використання BIM в цьому секторі [3]:

а) проєктування та проєктний менеджмент. BIM дозволяє інженерам та дизайнерам створювати тривимірні моделі споруд, що спрощує взаємодію між різними командами та допомагає уникнути конфліктів в конструкціях. Він дає можливість використання інтегрованих планів, розкладів та витрат для ефективного керування проєктами;

б) будівництво та монтаж. Застосування BIM дозволяє виробникам здійснювати віртуальне будівництво (Construction Virtualization) для оцінки та керування ризиками на етапі будівництва. Це сприяє ефективному вирішення питань координації та співпраці між різними підрядниками;

в) експлуатація та керування активами. Створення цифрових дублікатів активів, які дозволяють керувати, планувати та виконувати технічне обслуговування у реальному часі. Також використовують BIM для оптимізації ефективності та стійкості об'єктів під час експлуатації;

г) безпека та здоров'я. Моделі BIM можуть використовуватися для симуляцій та аналізу ризиків щодо безпеки на робочому місці та дозволяють вчасно виявляти потенційні небезпеки;

д) співпраця та звітність. Забезпечення спільного доступу до централізованих BIM-моделей для всіх учасників проєкту. Це зручна система збору даних та формування звітів для різних етапів життєвого циклу проєкту;

е) спрощення ремонтів та модернізацій. Використання BIM для точного планування та виконання ремонтів та модернізацій.

Впровадження BIM в нафтогазовій індустрії призначене для підвищення ефективності, зменшення ризиків та оптимізації керування проєктами та активами, що призводить до забезпечення сталого та конкурентоспроможного розвитку галузі.

Яким є сучасний курс розвитку в нафтогазовій індустрії?

Нафтогазова індустрія проходить через ряд трансформацій та відчутно відзначається з-поміж ключових тенденцій, спрямованих на покращення ефективності, сталий розвиток.

Ось деякі з основних аспектів сучасного курсу розвитку в цій галузі [4]:

1.Дігіталізація та використання технологій. Інтернет речей (IoT): збільшення використання сенсорів та IoT для моніторингу та керування обладнанням та активами.

Штучний інтелект (AI) та Машинне Навчання: застосування AI для прогнозування підходів до ремонтів та обслуговування обладнання.

2.Енергоефективність та сталість.Перехід до відновлювальних джерел енергії (ВДЕ): збільшення інвестицій у відновлювані джерела енергії та зменшення залежності від традиційних джерел.

Зменшення викидів та спрямованість на низький вуглецевий вміст: посилення зусиль щодо скорочення викидів та екологічно чистого видобутку.

3.Стратегічна цифрова трансформація. Використання BIM та цифрових технологій: інтеграція цифрових технологій для покращення керування проєктами та ефективності у всьому життєвому циклі.

4.Гнучкість та реагування на зміни. Агільність та ітеративний розвиток: застосування агільних методологій для ефективного реагування на зміни у вимогах та умовах.

5.Концентрація на інноваціях. Дослідження та розробка: інвестування у нові технології, які можуть підвищити видобуток та знизити витрати.

6.Глобальна енергетична безпека та ринки. Диверсифікація джерел постачання: зменшення залежності від окремих джерел, диверсифікація ринків та підвищення гнучкості в енергетичному портфелі.

Ці тенденції відзначають прагнення галузі до сталого, ефективного та інноваційного розвитку в умовах змінного світового енергетичного ландшафту. Галузь нафтогазу відчуває потребу в постійній адаптації до нових викликів, спрямованих на забезпечення більш сталих та конкурентоспроможних рішень.

Вплив таких технологій на етапи життєвого циклу проектів

Вплив BIM-технологій на етапи життєвого циклу проєктів у нафтогазовій галузі є визначальним для стратегічного вдосконалення проєктного керування та підвищення стійкості та ефективності.

На етапі проєктування та концепції BIM дозволяє візуалізувати і аналізувати концепції в тривимірних моделях, що сприяє кращому розумінню та прийняттю дизайнерських рішень. Під час дизайну та проєктування, інтеграція інженерних рішень у єдину BIM-модель полегшує узгодженість та координацію, забезпечуючи ефективне керування проектом [5].

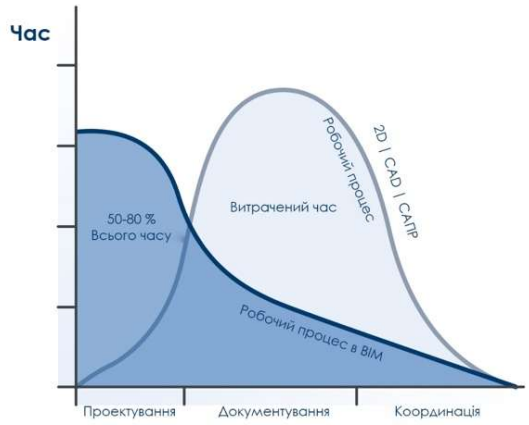


Рис. 1. Часові переваги використання BIM в порівнянні з 2D | CAD | САПР проектуванням [6]

На етапі будівництва та монтажу, віртуальне моделювання допомагає уникнути ризиків та покращити контроль якості та безпеки на будівельному майданчику. У фазі експлуатації, BIM дозволяє легко документувати та обмінюватися інформацією для полегшення технічного обслуговування та моніторингу стану активів. Фактично, на етап проєктування в цій технології потрібно виділити найбільше часу, проте його вдасться компенсувати на етапах документування та координації. В порівнянні зі стандартним (2D-проектуванням) це дозволяє зменшити загальні часові витрати на проєкт та спростити саму задачу (рис. 1), [6].

Важливий аспект - етап демонтажу та утилізації, де використання BIM дозволяє ефективно оцінювати відновлюваність та вплив на довкілля.

Керування інформацією та архівування забезпечує створення цифрових архівів для подальшого використання та збереження даних.

Впровадження BIM-технологій визначається як стратегічна ініціатива, спрямована на подальше удосконалення керування та забезпечення сталості та ефективності нафтогазових проектів у їхньому життєвому циклі.

Приклади з міжнародних нафтогазових компаній

Shell використовує BIM для покращення будівництва та демонтажу своїх споруд. Вони вдало інтегрують BIM-технології для віртуального моделювання будівельних процесів, що призводить до зменшення часу будівництва та оптимізації етапу демонтажу [7].

ExxonMobil активно використовує BIM для керування даними під час етапу експлуатації. Вони створюють цифрові архіви, що полегшують технічне обслуговування та забезпечують ефективний моніторинг стану активів, що підвищує ефективність та знижує витрати [8].

BP використовує BIM для концептуалізації проєктів та візуалізації ідеї. Це дозволяє їм швидше приймати стратегічні рішення та забезпечує краще розуміння концепцій серед усіх учасників проєкту [9].

Chevron успішно інтегрує інженерні рішення в єдину BIM-модель під час дизайну та проєктування. Це дозволяє їм підтримувати узгодженість та координацію між різними інженерними дисциплінами [10].

Ці приклади свідчать про те, як міжнародні нафтогазові компанії активно використовують BIM-технології для оптимізації різних етапів життєвого циклу своїх проєктів, сприяючи підвищенню ефективності та зменшенню ризиків.

Цифрове моделювання, чи технології BIM (Building Information Modeling), у нафтогазовому секторі виявляє значущі переваги для всього життєвого циклу проєктів, пристосованих до специфічних потреб цієї галузі [11].

Давайте розглянемо детальніше декілька ключових аспектів цих переваг:

1. Ефективне керування проєктами. Інтегрованість 3D-моделей: BIM забезпечує створення інтегрованих 3D-моделей, що дозволяє всім учасникам проєкту працювати з єдиним джерелом даних. Це полегшує

співпрацю та координацію між різними дисциплінами і відділами, що є ключовим для успішного завершення проєкту.

Координація та керування конфліктами: єдині точні дані дозволяють уникнути конфліктів та проблем під час будівництва. Будівельна команда може ефективно вирішувати питання та координувати роботу для підтримки чіткого виконання проєкту.

2. Підвищення точності та якості проєктів. Деталізовані 3D-моделі: BIM дозволяє створювати деталізовані 3D-моделі, в яких враховуються всі аспекти проєкту, від енергоефективності до конструктивних особливостей. Це забезпечує високу точність та якість проєкту, зменшуючи ймовірність помилок.

Віртуальне моделювання та аналіз: інструменти віртуального моделювання дозволяють проводити аналіз різних сценаріїв та оптимізувати проєкт ще до початку будівництва. Це допомагає уникнути непередбачених проблем та забезпечує ефективний дизайн.

3. Зменшення ризиків та витрат. Ідентифікація проблем на етапі проєктування: BIM дозволяє ідентифікувати потенційні проблеми та конфлікти ще до початку будівництва, що допомагає уникнути великих витрат на виправлення помилок під час реалізації проєкту [12].

Зменшення затрат на виправлення помилок: завдяки детальним 3D-моделям та аналізу, будівельні бригади можуть попередньо ідентифікувати проблеми та здійснювати виправлення на етапі планування, зменшуючи витрати на виправлення помилок під час будівництва.

4. Покращення ефективності будівництва. Оптимізація через віртуальне моделювання: BIM дозволяє оптимізувати будівельні процеси та робочі процедури, зменшуючи час будівництва та підвищуючи загальну ефективність.

Точність виконання робіт: за допомогою точних BIM-даних забезпечується відповідність проєкту реальності, що зменшує можливість помилок під час будівництва та покращує якість виконання робіт.

5. Сталість та сталеве виробництво. Віртуальне визначення впливу: BIM дозволяє віртуально визначати вплив на довкілля та оптимізовувати процеси сталевого виробництва з огляду на сталість та сталеві конструкції.

Тривале керування активами: після завершення проєкту BIM дозволяє тривало керувати активами, забезпечуючи їх сталість та тривалу експлуатацію.

Цифрове моделювання (BIM) в нафтогазовому секторі привносить значущі переваги, включаючи ефективне керування проєктами через інтегровані 3D-моделі, підвищення точності та якості завдяки деталізованим моделям, зменшення ризиків та витрат завдяки ідентифікації проблем на етапі проєктування, покращення ефективності будівництва через віртуальне моделювання та аналіз, а також сприяє сталості та оптимізації сталевого виробництва. Ці переваги роблять BIM ключовим інструментом для оптимізації проєктів у нафтогазовій індустрії.

Перешкоди в інтегруванні BIM-технологій у нафтогазову галузь

Інтеграція BIM-технологій у нафтогазову галузь, хоча і має значущий потенціал, може зіткнутися з деякими потенційними перешкодами. Давайте розглянемо деякі з них [3]:

1. Великий обсяг даних. Проєкти в нафтогазовій галузі можуть бути вкрай об'ємними та складними. Інтеграція великого обсягу даних в BIM може вимагати значних обчислювальних ресурсів та великих зусиль для забезпечення ефективного керування цим обсягом інформації.

2. Стандартизація даних. На відміну від інших галузей, в нафтогазовій індустрії може бути багато різних стандартів та форматів даних. Стандартизація для забезпечення взаємодії між всіма сторонами може бути складним завданням.

3. Велика кількість учасників проєкту. Проєкти в нафтогазовій галузі зазвичай залучають багато учасників, включаючи інженерів, підрядників, постачальників тощо. Керування співпрацею та координація між всіма сторонами може виявитися викликом.

4. Безпека та конфіденційність. В нафтогазовій галузі безпека та конфіденційність даних вкрай важливі. Використання зовнішніх платформ для обміну BIM-даними може підняти питання щодо забезпечення безпеки та витоку конфіденційної інформації.

5. Навчання та прийняття. Впровадження BIM може вимагати значних інвестицій у навчання персоналу та зміну внутрішньої

культури організацій. Деякі фахівці можуть чинити опір новим технологіям.

6. Інтеграція з існуючими системами. Багато компаній вже мають свої власні існуючі інформаційні системи. Інтеграція BIM з цими системами може виявитися складним завданням.

Вирішення цих викликів вимагатиме не лише технологічних рішень, але й стратегічного підходу до впровадження BIM, а також врахування специфіки та потреб нафтогазової галузі.

Вирішення вищевказаних проблем

Для успішної інтеграції BIM-технологій у нафтогазову галузь та подолання потенційних викликів, можна вжити кілька стратегій та підходів. Перш за все, важливо встановити стандарти для обміну даними та забезпечити їх взаємодію між всіма учасниками проєкту. Створення інфраструктури для безпечного обміну даними за допомогою хмарних платформ чи внутрішніх систем, що також є ключовим елементом [13].

Інвестиції у навчання персоналу та надання підтримки на різних етапах впровадження BIM є важливими для досягнення успіху. Додатково, важливо враховувати питання безпеки та конфіденційності даних, використовуючи захищені технології та встановлюючи сувору політику. Запуск пілотних проєктів перед широким впровадженням дозволяє тестувати BIM у реальних умовах та отримувати зворотний зв'язок.

Розробка інтеграційних рішень для легкої взаємодії BIM з існуючими інформаційними системами допомагає забезпечити взаємодію з існуючими структурами. Важливо також створити стратегію впровадження BIM, враховуючи конкретні особливості та потреби компанії чи проєкту. Співпраця у межах галузі та участь у спільних ініціативах сприяє розробці взаємнозрозумілих стандартів та підходів. Ці стратегії спільно допомагають подолати виклики та сприяють успішній інтеграції BIM-технологій у нафтогазову галузь [14].

Перспективи та стратегічні напрями розвитку в контексті швидкозмінюваного технологічного ландшафту та вимог сталої розвитку нафтогазової галузі

Розглянемо перспективи та стратегічні напрями розвитку нафтогазової галузі в контексті швидкозмінюваного технологічного ландшафту та вимог сталого розвитку [15].

Цифрова трансформація включає впровадження цифрових технологій, таких як інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI) та аналітика даних, для оптимізації виробничих процесів та керування.

Зелене енергетичне майбутнє передбачає перехід до відновлюваних джерел енергії та зменшення викидів для відповіді на вимоги сталого розвитку та врахування екологічних аспектів.

Рис. 2. Порівняння вартості та часу на проведення робіт з екологічним підходом та використання BIM-технологій та з традиційним підходом [16]

Інновації в бурінні та експлуатації включають розвиток та впровадження нових технологій для підвищення продуктивності та ефективного використання ресурсів.

Безпека та захист даних передбачає покращення кібербезпеки та захист важливих даних в умовах росту цифрових технологій.

Гнучкість та ефективність включають розробку гнучких моделей керування для швидкої реакції на зміни та оптимізації виробничих процесів.

Вдосконалення ланцюга постачання передбачає оптимізацію та вдосконалення для забезпечення стійкості у глобальних та локальних умовах.

Співпраця та партнерства включають розвиток стратегічних партнерств для спільної реалізації інноваційних проєктів.

Енергоефективність передбачає створення та впровадження енергоефективних технологій для зменшення витрат та підвищення економічної стійкості.

Таким чином ми можемо довести той факт, що екологічний підхід з BIM-технологіями у нафтогазовій галузі має прямий вплив на економічний фактор (вартість) і за той самий проміжок часу, використовуючи такий підхід,

ми отримуємо набагато меншу вартість виконання таких робіт (рис. 2), [16].

Ці стратегічні напрями враховують важливість технологічних інновацій, сталого розвитку та гнучкості для відповіді на сучасні виклики у нафтогазовій галузі. Їх впровадження сприяє сталому успіху та конкурентоспроможності компаній у цьому секторі.

Висновок. Дослідження впливу BIM-технологій на розвиток нафтогазової індустрії виявило великий потенціал цих інновацій для сектору енергетики. Впровадження цифрових технологій у всі аспекти виробництва, від буріння до експлуатації та керування проєктами, не тільки підвищує продуктивність, ефективність та енергоефективність, але й сприяє сталому розвитку та екологічній безпеці галузі.

Актуальність теми полягає в необхідності адаптації нафтогазової індустрії до сучасних викликів, таких як зменшення викидів, підвищення енергоефективності та гнучкіше керування виробництвом. Обрана тема дозволила дослідити переваги цифрових технологій, а також визначити потенційні перешкоди та шляхи їх подолання для впровадження BIM в нафтогазовому секторі.

Аналіз існуючих технологій у бурінні, використання BIM-технологій у нафтогазовій промисловості, а також підходи до керування проєктами стали ключовими аспектами дослідження. Розгляд цих тем дозволив виявити необхідність поєднання новітніх методик із сучасними технологіями для досягнення оптимальних результатів.

Усі аспекти роботи, включаючи аналіз технологій буріння, використання BIM та керування проектами, є взаємопов'язаними та спільно спрямованими на досягнення довговічності та конкурентоспроможності нафтогазової галузі в умовах сучасного ринкового середовища.

Дане аналітично-оглядове дослідження підтверджує, що впровадження BIM-технологій у нафтогазовій індустрії відкриває нові можливості для підвищення ефективності виробництва, сприяє зниженню витрат, підвищенню екологічної стійкості та сприяє розвитку сталої енергетичної системи.

Література

1. LinkedIn. URL: https://www.linkedin.com/pulse/unlocking-potential-bim-transforming-oil-gas-epc-ñwògu-mba-pmp--zwfnf/?trk=public_post_main-feed-card_feed-article-content (дата звернення: 15.04.2024).
2. DIASPHERE. URL: https://diaspherebim.com/service/building-information-modeling-in-oil-and-gas/ (дата звернення: 15.04.2024).
3. Waqar A, Othman I, González-Lezcano RA. Challenges to the Implementation of BIM for the Risk Management of Oil and Gas Construction Projects: Structural Equation Modeling Approach. Sustainability. 2023; 15(10):8019. https://doi.org/10.3390/su15108019.
4. Shaocong Pang, Luo Zhao, Yuxiu An, Advanced developments in nanotechnology and nanomaterials for the oil and gas industry: A review, Geoenergy Science and Engineering, Volume 238, 2024, 212872, ISSN 2949-8910, https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212872. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949891024002422).
5. EPCM Holdings. URL: https://epcmholdings.com/building-information-modeling-in-oil-and-gas/ (дата звернення: 02.03.2024).
6. Fridrich, Jan & Karel, Kubečka. BIM – The Process of Modern Civil Engineering in Higher Education. Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2014. 141. 763-767. 10.1016/j.sbspro.2014.05.134.
7. Shell. URL: https://www.shell.com/what-we-do/oil-and-natural-gas.html (дата звернення: 15.04.2024).
8. ExxonMobil. URL: https://corporate.exxonmobil.com/who-we-are/technology-and-collaborations/digital-technologies (дата звернення: 10.06.2024).
9. BP. URL: https://www.bp.com/en/global/corporate/what-we-do/oil-and-gas.html (дата звернення: 15.04.2024).
10. Chevron. URL: https://www.chevron.com/what-we-do/technology-and-innovation (дата звернення: 15.04.2024).
11. Kensek, K., & Nobuyuki, O. Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations. McGraw-Hill Professional. 2010.
12. PROFOUNDPROJECTS. URL: https://profoundprojects.com/services/consultancy/building-information-modeling/ (дата звернення: 02.03.2024).
13. Pinto, J. K., & Slevin, D. P. Critical factors in successful project implementation. IEEE Transactions on Engineering Management, 1987. (1), 22-27.
14. Schwalbe, K. Information Technology Project Management. Cengage Learning. 2018.
15. Алыгулиев, Ramiz & Alakbarova, Irada. BIG DATA problem in oil and gas industry: current state and

prospects. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. 2016. 22. 862– 869.
16. PlanRadar. URL: https://www.planradar.com/ru/bim-tekhnologii-v-stroitelstve/ (дата звернення: 15.04.2024).

References

1. LinkedIn. Available at: https://www.linkedin.com/pulse/unlocking-potential-bim-transforming-oil-gas-epc-ñwògu-mba-pmp--zwfnf/?trk=public_post_main-feed-card_feed-article-content (Accessed April 15, 2024).
2. DIASPHERE. Available at: https://diaspherebim.com/service/building-information-modeling-in-oil-and-gas/ (Accessed April 15, 2024).
3. Waqar A, Othman I, González-Lezcano RA. Challenges to the Implementation of BIM for the Risk Management of Oil and Gas Construction Projects: Structural Equation Modeling Approach. Sustainability. 2023; 15(10):8019. https://doi.org/10.3390/su15108019
4. Shaocong Pang, Luo Zhao, Yuxiu An, Advanced developments in nanotechnology and nanomaterials for the oil and gas industry: A review, Geoenergy Science and Engineering, Volume 238, 2024, 212872, ISSN 2949-8910, https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212872. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949891024002422)
5. EPCM Holdings. Avaliable at: https://epcmholdings.com/building-information-modeling-in-oil-and-gas/ (Accessed March 2, 2024).
6. Fridrich, Jan & Karel, Kubečka. BIM – The Process of Modern Civil Engineering in Higher Education. Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2014. 141. 763-767. 10.1016/j.sbspro.2014.05.134.
7. Shell. Avaliable at: https://www.shell.com/what-we-do/oil-and-natural-gas.html (Accessed April 15, 2024).
8. ExxonMobil. Avaliable at: https://corporate.exxonmobil.com/who-we-are/technology-and-collaborations/digital-technologies (Accessed
1. June 10, 2024).
9. BP. Avaliable at: https://www.bp.com/en/global/corporate/what-we-do/oil-and-gas.html (Accessed April 15, 2024).
10. Chevron. Avaliable at: https://www.chevron.com/what-we-do/technology-and-innovation (Accessed April 15, 2024).
11. Kensek, K., & Nobuyuki, O. Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations. McGraw-Hill Professional. 2010.
12. PROFOUNDPROJECTS. Avaliable at: https://profoundprojects.com/services/consultancy/building-information-modeling/ (Accessed March 2, 2024).
13. Pinto, J. K., & Slevin, D. P. Critical factors in successful project implementation. IEEE Transactions on Engineering Management, 1987. (1), 22-27.
14. Schwalbe, K. (2018). Information Technology Project Management. Cengage Learning.
15. Alyguliev, Ramiz & Alakbarova, Irada. BIG DATA problem in oil and gas industry: current state and prospects. INFORMATION TECHNOLOGIES. 2016. 862– 869.
16. PlanRadar. Avaliable at: https://www.planradar.com/ru/bim-tekhnologii-v-stroitelstve/ (Accessed April 15, 2024).

Danyliuk N.Y., Cheverda A.M. Assessment of the impact of BIM technologies on the development course of the oil and gas industry

This scientific article provides a comprehensive analysis of the impact of Building Information Modeling (BIM) technologies on the modern course of development in the oil and gas industry, highlighting the significance of implementing these technologies across various aspects of the sector. The article examines both current and future challenges faced by the oil and gas industry amid increasing project complexity and stringent efficiency and environmental sustainability requirements. Special attention is given to analyzing the impact of BIM on all stages of project life cycles, from conceptual design and planning to construction, operation, and asset management. The study reveals how digital technologies contribute to improving forecasting accuracy, optimizing resources, reducing costs, and mitigating risks during project implementation in the oil and gas sector. Additionally, it explores the integration of BIM with traditional project and asset management processes in the industry, as well as its potential to achieve more sustainable and efficient operations. Furthermore, the study examines how the use of BIM enhances occupational safety, monitors the technical condition of assets, and ensures compliance with environmental regulations—an aspect of increasing importance in today's global agenda. A separate section is dedicated to analyzing potential obstacles to BIM implementation, including technological, organizational, and financial barriers, and discussing strategies for overcoming them through business process adaptation and workforce upskilling. The study identifies key challenges such as the high cost of adopting new technologies, the necessity for corporate culture changes, and the integration of BIM with existing digital platforms. At the same time, the research underscores the importance of a strategic approach to BIM implementation, which should include the development of a regulatory framework, the advancement of educational programs for industry professionals, and the introduction of continuous performance monitoring systems. The article provides detailed recommendations for the strategic implementation of BIM in the oil and gas sector, considering the rapid advancement of

technologies and changes in the regulatory landscape. It also highlights possible future development paths for this technology, its role in ensuring the resilience and efficiency of oil and gas projects, and its contribution to fostering a more transparent and integrated approach to asset management. Additionally, the prospects of using BIM in combination with other cutting-edge technologies such as Artificial Intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and Big Data are explored, enabling the creation of digital twins of assets and real-time performance forecasting. Ultimately, the article presents a vision for the future of the oil and gas industry in the context of active BIM technology adoption, expanding the boundaries of possibilities for this critically important sector. The study's findings may be valuable to researchers, engineers, business leaders, and government organizations involved in developing strategies for the oil and gas sector's growth, aiming to enhance its efficiency and global competitiveness.

Keywords: *BIM technologies, oil and gas industry development course, information management, technology impact, digital transformation, innovation, optimization.*

Данилюк Назарій Ярославович – аспірант кафедри нафтогазового обладнання, спеціальності галузеве машинобудування, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м.Івано-Франківськ, d.nazariy97@gmail.com.

Чеверда Андрій Мирославович – аспірант кафедри нафтогазового обладнання, спеціальності галузеве машинобудування, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м.Івано-Франківськ, cheverda.andriy@gmail.com.

Стаття подана 15.02.2025.

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-30-38

УДК 004.94:655.1

APPLICATION OF COMPUTER DESIGN SYSTEMS (CAD) IN THE DEVELOPMENT OF INNOVATIVE PRINTING EQUIPMENT: SYNTHESIS OF FUNCTIONALITY AND DESIGN

Zenkin M.A., Ivanko A.I., Mialkovskyi V.Yu.

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО ПРОЄКТУВАННЯ (САПР) У РОЗРОБЦІ ІННОВАЦІЙНОГО ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ: СИНТЕЗ ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ ТА ДИЗАЙНУ

Зенкін М.А., Іванко А.І., Мялковський В.Ю.

The article presents a comprehensive study and development of scientific and practical approaches to the integration of computer-aided design (CAD) systems into the processes of creating innovative types and series of printing equipment, considering the synthesis of functionality and aesthetic design, which contributes to the improvement of the constructive and aesthetic parameters of printing systems. It was found that modern concepts of industrial design, which underlie the design of printing equipment, provide for a detailed analysis of human-machine interaction aimed at optimising the form, functionality and visual design of devices. The role of CAD as a key tool that not only improves the technological characteristics of printing systems, but also significantly reduces development time due to the capabilities of digital modelling and optimisation of structures, is studied. The advantages of using digital technologies that replace traditional drawing and modelling methods, simplifying the creation of technical documentation and making changes to constructive parameters, are assessed. It is substantiated that the automated generation of three-dimensional visualisations in CAD provides the design of the structure of printing systems considering materials, mechanical properties and ergonomic characteristics, allowing to simulate real operating conditions and conduct preliminary tests without the need to create physical prototypes. Approaches to the integration of CAD into specialised areas, such as computer-aided industrial design (CAID), conceptual design (CACD) and process design (CAPP), have been developed, which contribute to the optimisation of modelling and the identification of design flaws at an early stage. Ways to modernise existing CAD systems have been proposed to increase their flexibility in the development of innovative designs, taking into account the needs of the printing industry. It has been found that, despite a significant reduction in time and financial costs due to CAD, technological barriers remain associated with the lack of adaptability of software to the creation of complex mechanical systems, which requires further research.

Keywords: *computer-aided design systems, printing equipment, digital modelling, innovative printing technologies, industrial design, design optimisation.*

Introduction. In the process of developing and improving innovative printing equipment, the use of prototypes plays a crucial role in training, testing, and optimising engineering and design solutions. Prototypes can be both physical and digital, allowing for the evaluation of technical characteristics, functionality, and ergonomics of the product at different stages of development. The definition of a prototype may vary depending on the research context; however, its core essence lies in creating models with different levels of detail, enabling researchers and engineers to analyse, modify, and improve design solutions during the iterative development process. The use of prototypes contributes to the effective study of not only the problem space that arises during development but also the identification of optimal solutions to technical and structural challenges. Modern prototyping methods include a wide range of technologies, from traditional manual modelling and sketching to digital prototyping using 3D printing and computer modelling.

Within the framework of this study, special attention is paid to the use of Computer-Aided Design (CAD) systems as a key tool for creating and visualising 3D models that act as digital prototypes of printing machines. The use of CAD in the design of printing equipment not only speeds up the development process but also reduces costs associated with the creation of physical mock-ups thanks to the ability to conduct detailed analysis of design solutions in a digital environment. An important aspect is that CAD systems make it possible to test future equipment already at the stage of virtual modelling, which allows for the detection of potential structural flaws and the implementation of necessary adjustments without significant material costs. CAD software suites also play a significant role in the implementation of the so-called "conceptual CAD", which involves the active use of digital modelling at the early stages of development, prior to detailed technical design [16]. Research confirms that the use of CAD as a method of prototyping in the early stages of design and engineering enhances the accuracy of predicted characteristics of future products and simplifies their further implementation in production.

The aim of this article is to conduct a comprehensive study and develop scientific and practical approaches to the use of CAD in the development processes of innovative types and series of printing equipment, taking into account the synthesis of functionality and design, which contributes to the improvement of aesthetic and structural parameters.

Presentation of the main research material. The modern process of designing innovative printing equipment is based on the concepts of industrial design, which involves a comprehensive study of printing devices in the context of human–machine interaction with the aim of identifying optimal solutions regarding their form, functionality, and aesthetic design. The integration of CAD in the defined process plays a crucial role, as it enables not only the improvement of the technological parameters of printing systems, but also significantly shortens the development time through digital modelling and structural optimisation.

The use of CAD in the process of developing innovative printing equipment is a modern achievement that has created technological opportunities to integrate advanced digital modelling technologies and structural optimisation solutions to improve the quality, functionality, and aesthetic aspect of printing machines. Modern software suites for automated design are characterised by high performance, powerful computational capabilities, and the ability to process complex graphic models, which significantly shortens the development cycle of new products. As noted in [12], the implementation of CAD in the printing industry is reflected in the use of digital tools that replace traditional methods of drawing, sketching, and modelling, significantly simplifying the process of creating technical documentation and introducing changes to the design parameters of products (Figure 1).

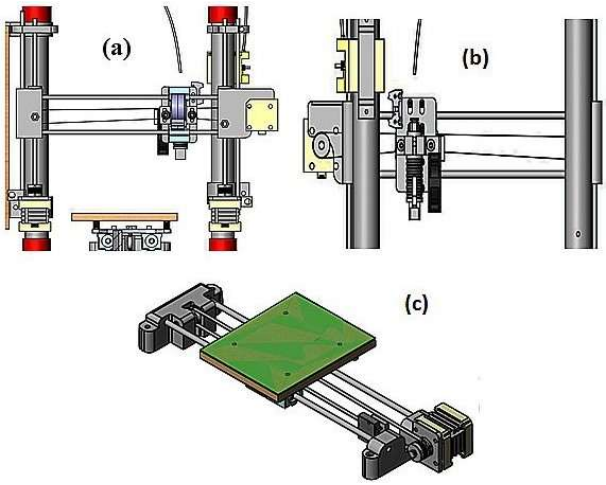


Fig. 1. Using CAD to model parts and components of a printing machine [14]

Thanks to this, digital technologies make it possible to carry out detailed design of printing system structures, determine optimal technical characteristics, and analyse the functional capabilities of future printing machines even at the modelling stage.

One of the key advantages of CAD in the development of printing equipment is the ability to automatically generate visualisations, which allows the creation of three-dimensional images of structures based on specified parameters, including materials, mechanical properties, and ergonomic characteristics. In this way, it is possible to simulate real operating conditions of printing equipment and conduct preliminary testing without expending resources on the production of physical samples [2]. These issues become important for further development of innovative solutions, where the combination of functionality and aesthetics plays a crucial role in creating competitive products. Modern information technologies, especially those related to automated design, have become an integral part of the process of creating new products, as they not only simplify the development stages but

also contribute to shortening the production cycle and improving engineering accuracy [1].

Today, CAD is widely used in all stages of engineering design, particularly in specialised areas such as CAID, CACD, and CAPP. The implementation of these systems creates opportunities for manufacturers of printing machines to optimise modelling processes, identify potential design flaws, and integrate innovative solutions already at the design planning stage (Figure 2).

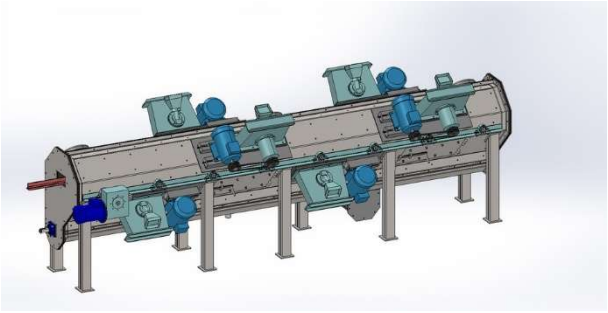


Fig. 2. Localisation and search for design flaws in the design of printing machines [15]

However, the main issue that remains relevant both in the industrial environment and in academic research is the need to adapt traditional CAD systems to ensure flexibility in the development of innovative designs for printing equipment. Therefore, the question of how to modernise existing software platforms in accordance with industry needs remains one of the key areas for further research.

Although the use of automated design has significantly reduced the time and financial costs involved in developing new printing devices, certain technological barriers still exist that limit the possibilities for a complete transition to digital design. One of the main problems lies in the fact that a considerable number of designers and engineers continue to work with highly specialised software products, which do not always provide the necessary flexibility for creating complex mechanical systems. This is particularly relevant during the stage of three-dimensional modelling, where it is necessary not only to build a geometrically accurate model of the printing mechanism but also to take into account all its operational characteristics, ergonomics, ease of maintenance, and visual appeal [9]. Although modern CAD packages for engineering modelling offer powerful tools for creating complex models, the development process remains rather labour-intensive and requires significant calculations and analytical work (Figure 3).

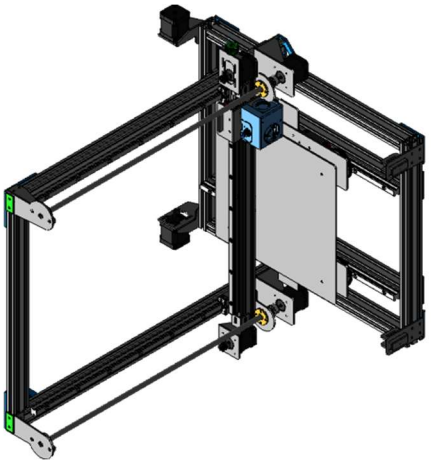


Fig. 3. CAD design of geometric correction of a separate printing mechanism [14]

However, in the case of printing equipment, there arises the need not only for high-quality visualisation but also for precise calculations of all structural features, which requires the integration of CAD with other technologies for graphic data processing. The use of specialised software may be useful for image correction and improving visual perception, but for engineering modelling, it is necessary to apply specialised tools that ensure full compliance between the digital prototype and its physical analogue.

In the process of developing innovative printing equipment, special attention is paid to analysing user needs, which allows a better understanding of the potential benefits that new technological solutions may provide in terms of functionality and design. As noted in [4], before starting industrial design development, it is necessary to conduct a comprehensive analysis of the positioning of the future product, which includes the use of modern digital tools, particularly big data processing technologies. The integration of big data management algorithms into the development process of printing equipment allows for systematising market information, analysing consumer feedback on the functional characteristics of printing devices, and, based on this, optimising engineering solutions to ensure their compliance with modern requirements (Figure 4).

Such an approach contributes to the effective generalisation of the obtained data, the formulation of strategies for further structural improvement, and the creation of innovative solutions that align with market trends. In the context of rapid technological development and increasing competition in the printing industry, the application of big data analytics is essential for forming competitive advantages that facilitate the development of new

high-tech products with improved characteristics [10].

Fig. 4. An example of innovative CAD design of printing equipment [13]

The intellectualisation of the printing equipment design process largely depends on the use of advanced methods of computer-aided design (CAD), which allow for increased personalisation and flexibility in the design and functional content of devices. As noted in [7], modern industrial design is gradually evolving from a traditional approach focused solely on functionality to an intelligent design model that considers user needs and integrates them into the development process. Thanks to digital technologies, there is a gradual transformation of industrial design in printing equipment, allowing companies to create products with improved technical characteristics that better meet customer expectations. An important factor influencing the development of this direction is the widespread adoption of internet technologies and digital platforms, which not only improve interaction between manufacturers and consumers but also contribute to the development of more effective project management systems in the field of automated design (Figure 5).

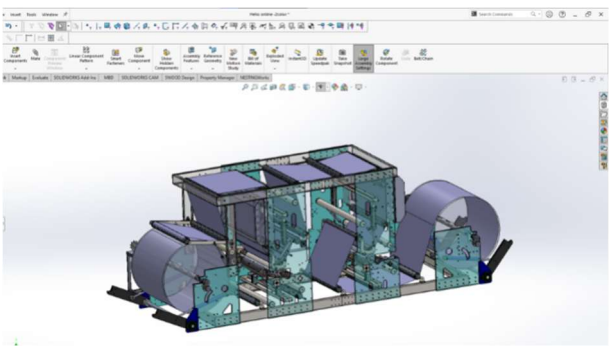


Fig. 5. Industrial design of a roll-to-roll printing machine [13]

Computer technologies play a crucial role in modernising the process of creating innovative printing equipment, as they significantly simplify operations related to graphic data processing, structural modelling, and testing of technical parameters. As noted in [8], the use of automated systems in design allows for the acceleration of structural variant analysis, the introduction of necessary adjustments to product parameters, and a comprehensive comparison of technical characteristics, which contributes to determining the optimal solution. One of the key advantages of CAD is the ability to store digital data on designs and graphic images in a unified system, ensuring quick access to necessary information and simplifying the decision-making process. Compared to traditional drawing methods, which required significant time and resources, the use of CAD allows for much faster and more efficient design processes, as well as simplifying the implementation of changes and the execution of operations such as copying, scaling, transformation, and mirroring of models (Figure 6).

Fig. 6. Design concept of a printing press (book printing) [13]

Modern automated design technologies are becoming the foundation for the implementation of innovative solutions in the production of printing equipment, combining data processing, digital modelling, numerical control, and rapid prototyping. As noted in [6], the development of automated industrial systems enables the integration of virtual design with manufacturing processes, contributing to the creation of more efficient and high-tech printing machines [11].

Flexographic printing machines and automated design. Flexographic printing, or flexo for short, is one of the most dynamically developing and technologically flexible methods of printing production, widely used for the creation of packaging products in large print runs. Due to the ability to work with a wide range of materials, including paper, plastic, foil, and cardboard, this technology is indispensable for the production of

labels, packaging, and specialised printed products. The use of CAD in the design process of flexographic machines allows engineers to automate the development of structural elements, perform accurate calculations of printing parameters, and optimise equipment settings to achieve maximum production efficiency (Figure 7).

Fig. 7. Modern design of a flexographic printing press [5]

The use of CAD enables the creation of virtual prototypes of flexographic devices, testing their performance under different operating conditions, and adjusting design features before the stage of producing physical samples. Thanks to digital control and the integration of sensor technologies, modern flexographic printing machines are equipped with high-precision colour registration control systems, which help reduce errors and ensure high print quality even on complex substrates [4].

Gravure printing machines and their optimisation through digital technologies. Gravure printing, also known as rotogravure, is one of the oldest yet most precise printing methods, used for producing materials with detailed graphic elements and a high level of colour saturation. The use of modern algorithms in CAD significantly reduces the time required for the development of gravure printing cylinders, which were previously made manually or through complex mechanical processes (Figure 8).

Thanks to digital technologies, it is possible to automate the process of laser engraving of cylinders, which ensures more precise control over the shape and size of printing cells. The use of specialised software also allows simulation of the printing process, considering parameters such as ink viscosity, cylinder rotation speed, and the interaction between the substrate and the printing drum. The implementation of CAD in the design of gravure printing machines enables the creation of high-performance equipment with enhanced automation and quality control capabilities [2].

Fig. 8. Updated design of the gravure printing machine [5]

Digital printing has become one of the most promising technologies in the field of printing, as it allows for high-precision printing without the need for traditional printing plates. The use of digital printing machines enables quick adjustment of the production process, reduction of prepress costs, and the ability to produce personalised products even in small print runs. The use of CAD in the design of digital printing devices allows the creation of efficient ink supply control systems, colour reproduction regulation, and print parameter settings, ensuring consistent image quality regardless of the type of substrate (Figure 9) [16].

Fig. 9. 3D design model of a digital printing system [5]

However, traditional computer-aided design (CAD) systems still have certain limitations, including insufficient levels of intellectualisation, instability in theoretical foundations, and low flexibility in implementing innovative design concepts. Therefore, current research is focused on improving CAD through the integration of big data management algorithms, which significantly enhance design quality and the adaptability of products to market needs. Computerised design management systems in printing equipment not only improve development efficiency but also enhance communication between designers,

engineers, and clients, enabling quicker responses to changing product requirements and the development of optimal solutions [12].

The use of big data management technologies in combination with automated design opens new possibilities for the development of the printing industry, providing greater flexibility, accuracy, and personalisation in the creation of printing systems. Cooperation between CAD systems and big data processing technologies significantly reduces development times while ensuring product adaptation to modern demands. The use of integrated solutions such as CAID creates an effective feedback mechanism between manufacturers and the market, allowing rapid consideration of customer preferences and the modernisation of designs in response to changes in demand [4].

Software for automated design processes in the printing industry is a complex engineering tool that enables analysis, identification of potential weaknesses in technical solutions, and the implementation of innovative approaches to increase the efficiency of printing machines. The work process with automated design systems is divided into several stages, each requiring detailed analysis of previous results to identify design flaws and possible ways to eliminate them. After this analysis, modern technological solutions are integrated into the design, which provide high equipment productivity, improved print quality, and increased operational reliability of printing machines. The use of CAD in the design process not only accelerates development but also allows the creation of virtual prototypes, their verification, and evaluation, which significantly reduces the likelihood of errors even at the construction stage. Thanks to automated design methods, which are actively used in intelligent manufacturing environments, new printing device designs are being developed that take into account current requirements for design and technological parameters [11].

As demonstrated in Figure 10, various design drawings are created during the use of CAD, including those for arbitrary surfaces and complex composite structures. These technological capabilities allow engineers to develop high-precision models of future printing machines that comply with strict quality standards.

The complexity of geometric drawings created using CAD highlights the effectiveness of these digital tools and their ability to generate detailed visualisations that reflect all the structural features of future devices. Furthermore, the analysis of the production environment under conditions of automated design indicates the need to implement collaborative technologies, which allow designers, engineers, and end-users to be integrated into a unified development process [3]. The introduction of intelligent algorithms in combination with automation systems enables the creation of high-tech printing machines that meet modern market demands. Trends in the development of CAD in the printing industry demonstrate that the future of printing production depends on innovative approaches to synthesising functionality and design, which will allow companies to adapt to changing consumer needs and expand printing capabilities in the digital era.

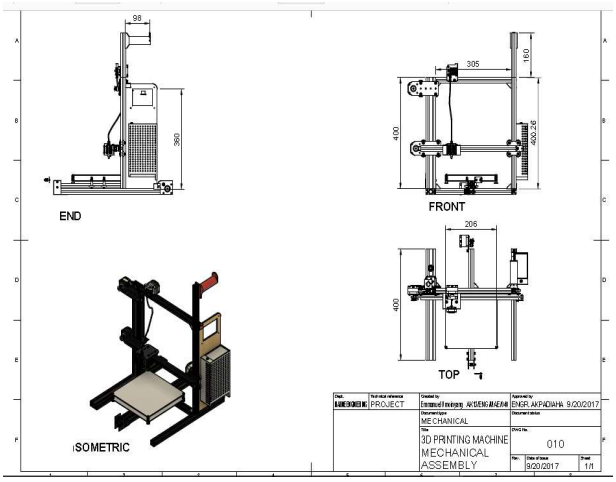


Fig. 10. Geometric visualisation of the appearance of a printing press CD [3]

Conclusion. The possibility of implementing digital technologies in the development of printing equipment has been studied, in particular through the use of computer modelling, analysis of the mechanical properties of structures, automated visualisation of technical solutions, and optimisation of printing mechanisms. The feasibility of using integrated software solutions for automated design of printing equipment has been substantiated, which enables improvement of modelling, visualisation, and simulation processes of printing mechanisms. It has been noted that the integration of algorithms for working with big data into the design process facilitates the analysis of market trends, forecasting changes in technological processes, and prompt adjustment of design parameters in accordance with consumer needs.

A conceptual model for the integration of CAD systems into the development processes of flexographic, gravure, and digital printing equipment has been developed. The model

envisages the use of virtual modelling, automated analysis of the mechanical properties of structures, intelligent control of technological processes, and an increased level of production automation.

Література

1. Македон В. В., Холод О. Г., Ярмоленко Л. І. Модель оцінки конкурентоспроможності високотехнологічних підприємств на засадах формування ключових компетенцій. Академічний огляд. 2023. № 2 (59). С. 75-89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5.
2. Ajao K.R., Ibitoye S.E., Adesiji A.D., Akinlabi E.T. Design and Construction of a Low-Cost-High-Accessibility 3D Printing Machine for Producing Plastic Components. Journal of Composites Science. 2022. no 6(9). 265. https://doi.org/10.3390/jcs6090265
3. Akhilesh, Musavvir M., Sameer M., Shashikanth G. Design and Development of 3D Printing Machine. International Journal of Scientific Research and Engineering Development. 2020. №3(3). pp. 1–8. https://ijsred.com/volume3/issue3/IJSRED-V3I3P1.pdf
4. Budinoff H.D., Kramer J. CAD as a Virtual Prototyping Method: Uses and Timing of Computer-Aided Design Artifacts in Hardware Design. International Journal of Engineering Education. 2022. Vol. 38. No. 6. pp. 1747–1760.
5. The Different Types of Printing Press: Exploring Variety in Print Technology. URL: https://www.ketegroup.com/exploring-the-different-types-of-printing-press/
6. Gilmanova A.M. Computer-aided design systems for product life cycle stages. Journal of Physics: Conference Series. 2020. №1661(1). pp. 012205. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012205
7. Hunde B.R., Woldeyohannes A.D. Future prospects of computer-aided design (CAD) – A review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended reality, and 3D printing. Results in Engineering. 2022. №14. pp. 100478. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100478
8. Ji Y.-J., Guo Y.-J., Gao F.-Q., You X.-P., Liu Z.-H., Zheng Q.-M. Design of pattern drawing software for 3D food printing equipment. In: Xia J. (Ed.), Proceedings of the Second International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS 2022), SPIE. 2022. Vol. 12474. 124740D. https://doi.org/10.1117/12.2654061
9. Li N., Liu C. Computer-Aided Industrial Design in the Context of Intelligent Manufacturing. Computer-Aided Design & Applications. 2025. Vol. 22(S9). pp. 14–26. https://doi.org/10.14733/cadaps.2025.S9.14-26
10. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunenko N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. no 2(13(128)). p. 47-57. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796.
11. Metelenko N. G., Kovalenko O. V., Makedon V., Merzhynskyi Y. K., Rudych A. I. Infrastructure Security of Formation and Development of Sectoral Corporate Clusters. Journal of Security and Sustainability Issues. 2019. №9(1). pp. 77–89. http://doi.org/10.9770/jssi.2019.9.1(7)
12. Mikolajczyk T., Malinowski T., Moldovan L., Hu F., Paczkowski T., Ciobanu I. CAD CAM System for Manufacturing Innovative Hybrid Design Using 3D Printing. Procedia Manufacturing. 2019. №32. pp. 22–28. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.178
13. Pinterest. URL: https://www.pinterest.com/pin/3377768463203450/
14. Tan, Q., & Li, H. Application of Computer-Aided Design in Product Innovation and Development-Taking in Industrial Design Process. IEEE Access. 2024. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3404963
15. Wang R., Fang T., Zhou X. Computer-Aided Cultural and Creative Product Design Based on Reinforcement Learning. Computer-Aided Design and Applications. 2025. Vol. 22(S7). pp. 55-67. https://doi.org/10.14733/cadaps.2025.S7.55-67
16. Wang J., Xu P. Innovative Application of CAD Technology in Animation Design and Its Integration with Visual Teaching. Computer-Aided Design and Applications. 2024. Vol. 21(S27). pp. 229–244. https://doi.org/10.14733/cadaps.2024.S27.229-244

References

1. Makedon V. V., Kholod O. H., Yarmolenko L. I. Model otsinky konkurentospromozhnosti vysokotekhnolohichnykh pidpryiemstv na zasadakh formuvannia kliuchovykh kompetentsii. Akademichnyi ohliad. 2023. № 2 (59). pp. 75-89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5.
2. Ajao K.R., Ibitoye S.E., Adesiji A.D., Akinlabi E.T. Design and Construction of a Low-Cost-High-Accessibility 3D Printing Machine for Producing Plastic Components. Journal of Composites Science. 2022. no 6(9). 265. https://doi.org/10.3390/jcs6090265
3. Akhilesh, Musavvir M., Sameer M., Shashikanth G. Design and Development of 3D Printing Machine. International Journal of Scientific Research and Engineering Development. 2020. №3(3). pp. 1–8. https://ijsred.com/volume3/issue3/IJSRED-V3I3P1.pdf
4. Budinoff H.D., Kramer J. CAD as a Virtual Prototyping Method: Uses and Timing of Computer-Aided Design Artifacts in Hardware Design. International Journal of Engineering Education. 2022. Vol. 38. No. 6. pp. 1747–1760.
5. The Different Types of Printing Press: Exploring Variety in Print Technology. URL:

https://www.ketegroup.com/exploring-the-different-types-of-printing-press/
6. Gilmanova A.M. Computer-aided design systems for product life cycle stages. Journal of Physics: Conference Series. 2020. №1661(1). pp. 012205. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012205
7. Hunde B.R., Woldeyohannes A.D. Future prospects of computer-aided design (CAD) – A review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended reality, and 3D printing. Results in Engineering. 2022. №14. pp. 100478. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100478
8. Ji Y.-J., Guo Y.-J., Gao F.-Q., You X.-P., Liu Z.-H., Zheng Q.-M. Design of pattern drawing software for 3D food printing equipment. In: Xia J. (Ed.), Proceedings of the Second International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS 2022), SPIE. 2022. Vol. 12474. 124740D. https://doi.org/10.1117/12.2654061
9. Li N., Liu C. Computer-Aided Industrial Design in the Context of Intelligent Manufacturing. Computer-Aided Design & Applications. 2025. Vol. 22(S9). pp. 14–26. https://doi.org/10.14733/cadaps.2025.S9.14-26
10. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunenko N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. no 2(13(128)). p. 47-57. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796.
11. Metelenko N. G., Kovalenko O. V., Makedon V., Merzhynskyi Y. K., Rudych A. I. Infrastructure Security of Formation and Development of Sectoral Corporate Clusters. Journal of Security and Sustainability Issues. 2019. №9(1). pp. 77–89. http://doi.org/10.9770/jssi.2019.9.1(7)
12. Mikolajczyk T., Malinowski T., Moldovan L., Hu F., Paczkowski T., Ciobanu I. CAD CAM System for Manufacturing Innovative Hybrid Design Using 3D Printing. Procedia Manufacturing. 2019. №32. pp. 22–28. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.178
13. Pinterest. URL: https://www.pinterest.com/pin/3377768463203450/
14. Tan, Q., & Li, H. Application of Computer-Aided Design in Product Innovation and Development-Taking in Industrial Design Process. IEEE Access. 2024. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3404963
15. Wang R., Fang T., Zhou X. Computer-Aided Cultural and Creative Product Design Based on Reinforcement Learning. Computer-Aided Design and Applications. 2025. Vol. 22(S7). pp. 55-67. https://doi.org/10.14733/cadaps.2025.S7.55-67
16. Wang J., Xu P. Innovative Application of CAD Technology in Animation Design and Its Integration with Visual Teaching. Computer-Aided Design and Applications. 2024. Vol. 21(S27). pp. 229–244. https://doi.org/10.14733/cadaps.2024.S27.229-244

Зенкін М.А., Іванко А.І., Мялковський В.Ю. Застосування систем автоматичного проєктування (САПР) у розробці інноваційного поліграфічного обладнання: синтез функціональності та дизайну

У статті проведено комплексне дослідження та обґрунтування науково-практичних підходів до інтеграції систем автоматизованого проєктування (САПР) у процеси створення інноваційних видів і серій поліграфічного обладнання, враховуючи синтез функціональності та естетичного дизайну, що сприяє вдосконаленню конструктивних і естетичних параметрів друкарських систем. Виявлено, що сучасні концепції промислового дизайну, які лежать в основі проєктування поліграфічного обладнання, передбачають детальний аналіз взаємодії людини з машиною, спрямований на оптимізацію форми, функціональності та візуального оформлення пристроїв. Досліджено роль САПР як ключового інструменту, який не лише підвищує технологічні характеристики друкарських систем, але й суттєво скорочує час розробки завдяки можливостям цифрового моделювання та оптимізації конструкцій. Оцінено переваги використання цифрових технологій, які замінюють традиційні методи креслення та моделювання, спрощуючи створення технічної документації та внесення змін до конструктивних параметрів. Обґрунтовано, що автоматизована генерація тривимірних візуалізацій у САПР забезпечує проєктування структури поліграфічних систем із врахуванням матеріалів, механічних властивостей та ергономічних характеристик, дозволяючи імітувати реальні умови експлуатації та проводити попередні тести без необхідності створення фізичних прототипів. Розроблено підходи до інтеграції САПР у спеціалізовані сфери, такі як автоматизоване промислове проєктування (CAID), концептуальне проєктування (CACD) та проєктування процесів (CAPP), що сприяють оптимізації моделювання та виявленню конструктивних недоліків на ранніх етапах. Запропоновано шляхи модернізації існуючих САПР-систем для підвищення їхньої гнучкості у розробці інноваційних конструкцій, враховуючи потреби поліграфічної галузі. Виявлено, що, попри значне зменшення часових і фінансових витрат завдяки САПР, залишаються технологічні бар'єри, пов'язані з недостатньою адаптивністю програмного забезпечення до створення складних механічних систем, що потребує подальших досліджень.

Ключові слова: *системи автоматизованого проєктування, поліграфічне обладнання, цифрове моделювання, інноваційні технології друку, промисловий дизайн, оптимізація конструкцій.*

Зенкін Микола Анатолійович – д.т.н., професор, професор кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ), nikolay_zenkin@ukr.net

Іванко Андрій Іванович – к.т.н., доцент, доцент кафедри кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ), ivanko-a@ukr.net

Мялковський Владислав Юрійович – аспірант кафедри кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ), vladmalkovskij99@gmail.com

Стаття подана 23.01.2025.

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-39-45

УДК 621

ВИКИДИ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ВІД СИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ЕНЕРГІЇ НА ВИКОПАНОМУ ПАЛИВІ

Мелконова І.В., Мелконов Г.Л.

GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM FOSSIL FUEL-BASED POWER GENERATION SYSTEMS

Melkonova I.V., Melkonov H.L.

Глобальне потепління є визнаною загрозою для стабільності клімату Землі. Єдиний шлях контролювати глобальне потепління означає контролювати концентрацію парникових газів у атмосфера. Є лише два способи зробити це: замінити паливо з високим вмістом вуглецю на паливо з низьким вмістом вуглецю або безвуглецеве паливо; виробляти та використовувати енергію більш ефективно.

Концентрація вуглекислого газу в атмосфері вперше в історії людства досягла максимального рівня, а 67% викидів парникових газів спричиняє саме енергетика і спалювання викопних видів палива. Великий рівень концентрації вуглекислого газу спостерігався близько 3 – 5 млн років тому, коли температура на Землі була на кілька градусів вища, ніж зараз. Зокрема у 2018 році цей показник становив 405,5 ppm. Зазвичай кількість CO2 змінюється в залежності від пори року, найбільші показники фіксуються у північній півкулі навесні та на початку літа. Проте середньорічна концентрація CO2 неухильно збільшується. Вчені пов'язують це з використанням твердих видів палива, адже 67% викидів парникових газів спричинено саме енергетикою та спалюванням викопних видів палива, що призводить до підвищення середньої глобальної температури.

З огляду на нагальну потребу посилення екологічного контролю за станом повітря, та пошуків шляхів зниження концентрації CO2 в атмосферному повітрі необхідні пошуки нових шляхів вирішення цієї ситуації та розробки систем моніторингу контролю атмосферних викидів. Ці заходи дадуть змогу значно зменшити обсяги викидів в атмосферу.

Прямі викиди від виробництва електроенергії базуються на національних даних або розраховуються на основі джерел виробництва електроенергії та коефіцієнтів викидів бази даних. Коефіцієнти викидів визначаються для країни і основних технологій, джерел палива, тому можуть не відображати реальні характеристики палива, зміни ефективності виробництва електроенергії, різні підходи до розподілу викидів у випадку когенерації та деякі інші фактори. Результати розрахунку залишкових коефіцієнтів для європейських країн публікуються щорічно. Залишкові коефіцієнти викидів для електроенергії можуть розраховуватися і на рівні окремих країн.

Ключеві слова: *екологія, вуглекислий газ, викопне паливо, електроенергія, гази, викиди.*

Вступ. Глобальна концентрація CO_2 в атмосфері значно зросла після індустріалізації, піднявшись з 280 ppm до промислової революції [1] до 419,3 ppm у 2023 році, з поточним темпом зростання 2–3 ppm на рік. Збільшення глобальної концентрації вуглекислого газу в атмосфері в основному викликано викидами від діяльності людини [2], причому приблизно половина цих викидів походить від великих установок, таких як електростанції, транспортний сектор і важка промисловість [3]. Глобальні викиди CO2, пов'язані з енергетикою, досягли нового максимуму в 36,8 Гт у 2023 році [4]. Отже, встановлено, що збільшення викидів вуглецю суттєво впливає на глобальну зміну клімату, створюючи загрозу у вигляді екстремальних погодних явищ, стихійних лих та значних економічних і соціальних втрат [4]. За даними Океанографічного інституту Скрипса, минулого року концентрація вуглекислого газу

в атмосфері вперше в історії людства сягнула найвищого рівня – 415,26 ppm. Такий рівень концентрації вуглекислого газу спостерігався близько 3 - 5 млн років тому, коли температура на Землі була на кілька градусів вищою, ніж тепер. Зокрема, у 2018 році цей показник становив 405,5 ppm. Зазвичай кількість CO2 сильно коливається в залежності від пори року, досягаючи максимуму в північній півкулі навесні та на початку літа. Однак, середньорічна концентрація CO2 продовжує неухильно зростати. Вчені пов'язують цей факт зі спалюванням твердих видів палива, адже 67% викидів парникових газів спричиняє саме енергетика та спалювання викопних видів палива, які й призводять до зростання глобальної середньої температури. За попередніми прогнозами, забруднення атмосфери у 2019 році значно прискориться.

Як відомо, вуглекислий газ (CO_2) утворюється в результаті спалювання викопних видів палива, зокрема вугілля. За даними наукових досліджень, навіть невелика кількість вуглекислого газу може бути токсичною та викликати біохімічні зміни в крові людини, біль у суглобах, слабкість, порушення кислотно-лужного балансу, зниження імунітету, стати причиною захворювань нирок та серцево-судинної системи.

У результаті у світі почала формуватися кліматична політика, спрямована на боротьбу зі змінами клімату та декарбонізації економіки, яка знайшла своє відображення у "Європейській зеленій угоді" та Паризькій угоді 2015 року.

Європейський Союз поставив за мету: щоб до 2050 року Європа стала першим континентом, економіка якого не шкодить природі. Україна готова стати невід'ємною частиною цієї успішної історії. У січні 2020 року Міністр енергетики та захисту довкілля України Олексій Оржель презентував проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року, який зумовлений трансформацією підходів до розвитку енергетики у світі та особливою увагою до проблем боротьби зі зміною клімату. Концепцією передбачено повне заміщення вугільної генерації та перехід економіки України, що базується на використанні викопних видів палива - вугілля, нафти, газу, до кліматично нейтральної економіки у довгостроковій перспективі.

Наразі Міністерство енергетики та захисту довкілля України опрацьовує комплекс рішень, які знайдуть відображення у Концепції реформування державного сектору вугільної галузі.

Постановка проблеми. З огляду на нагальну потребу посилення екологічного контролю за станом повітря, та пошуків шляхів зниження концентрації CO2 в атмосферному повітрі необхідні пошуки нових шляхів вирішення цієї ситуації та розробки систем моніторингу контролю атмосферних викидів. Ці заходи дадуть змогу значно зменшити обсяги викидів в атмосферу.

Метою роботи є аналіз причин та статистики викидів CO2 спричинених генерацією електричної енергії викопного палива та шляхи пошуку рішень поліпшення екологічної обстановки у зв’язку з даною проблемою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Щоб зменшити тиск на баланс вуглецевого циклу, спричинений постійним зростанням концентрації CO_2 в атмосфері, у всьому світі були докладені зусилля щодо прийняття заходів пом’якшення антропогенних викидів вуглецю [5]. Паризька кліматична угода, прийнята в 2015 році [6], вимагає, щоб кожна країна-підписант точно звітувала про свої викиди парникових газів і скорочувала майбутні викиди після визначення свого національно визначеного внеску. Супутники дистанційного зондування, як ключовий інструмент для спостереження Землі, служать важливою платформою для надійного та реалістичного виявлення антропогенних викидів вуглецю у великому масштабі та протягом тривалого часового ряду, як зазначено у звіті Об’єднаного дослідницького центру (JRC) [39]. База даних про викиди глобальних атмосферних досліджень (EDGAR) (Об’єднаний дослідницький центр [Європейська комісія] та ін., 2023 р.) вказує на те, що серед основних секторів, що генерують викиди, енергетична промисловість незмінно займає найвищі позиції за викидами CO2 з 1990 року. Тому вдосконалення методів оцінки викидів CO_2 на одиницю від вугільних електростанцій має важливе значення для забезпечення висхідного аналізу. дані про викиди для країн з неадекватною системою звітності [7]. Наразі в різних країнах використовуються три основні методи моніторингу викидів CO2 від електростанцій: (1) моделювання знизу вгору на основі даних про споживання палива та коефіцієнтів викидів, (2) прямий моніторинг викидів CO_2 від димових газів із труби та (3) моделювання зверху вниз на основі оцінених

концентрацій газу або потоків від окремих установок. Інвентаризація викидів обмежена наявністю та точністю статистичних даних. Моделювання «знизу вгору» може призвести до пропуску даних з певних електростанцій, що потенційно може призвести до значного заниження викидів. Системи безперервного моніторингу викидів (CEMS) [8] для викидів димових газів рідко включають моніторинг потоків CO_2, незважаючи на можливість моніторингу потоків викидів з димової труби від вугільних електростанцій [9]. Розробка технології кількісного дистанційного зондування дозволила ідентифікувати інформацію про викиди з супутникових даних за допомогою моделювання атмосферної дисперсії, забезпечивши новий метод для оцінки викидів CO_2 з високою часовою та просторовою роздільною здатністю. Цей підхід є менш чутливим до антропогенних і статистичних помилок і пропонує надійні можливості моніторингу викидів CO_2, що відповідають політичним вимогам [10].

Результати дослідження.

Основними «кіотськими» парниковими газами є CO_2, CH_4 і N_2O, які виділяються з обох енергетичні та неенергетичні джерела. Також включені гідрофторвуглеці, перфторвуглеці і гексафторид сірки, які мають відносно високий потенціал глобального потепління, але є викидаються в невеликих обсягах і здебільшого не пов'язані з енергією. Викиди різних газів виражається як еквівалент CO_2 на основі подібних глобальних потенціал потепління (GW) протягом 100-річного періоду.

Таблиця 1

Потенціали глобального потепління [1]

Газ	Потенціал глобального потепління для різних часових горизонтів		
	20 років	100 років	500 років
CO_2	1	1	1
CH_4	56	21	6,5
N_2O	280	310	170
HFC-23	9100	11700	9800
HFC-32	2100	650	200
SF6	16300	23900	34900

Виходячи з кількості викидного газу та GWP, внесок різний парникових газів до глобального потепління для ЄС у 1990 р. показано на рис. 1. Хоча існує згода між різними джерелами щодо частки окремих парникових газів, значення загальних викидів коливається від 3938 Мт CO_2.

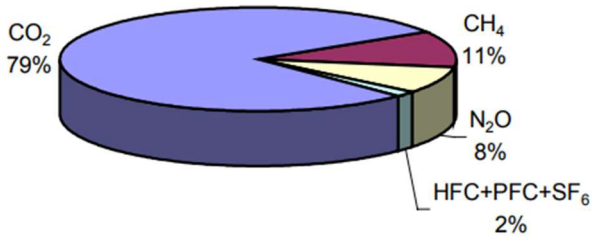


Рис. 1. Викиди на основі GWP за типом газу, ЄС, 1990

Подібним чином рис. 2 відображає ситуацію в США в 1998 році (загальний обсяг 1,8 Гт С, типовий для промислово розвинених регіонів світу).

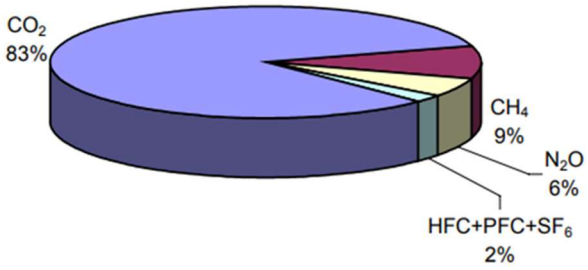


Рис. 2. Викиди на основі GWP за типом газу, США, 1998

З цих цифр чітко видно, що найбільший внесок у парниковий ефект виникає через викиди CO_2. Серед інших парникових газів. Викиди метану та закису азоту в останні роки залишаються стабільними або мають тенденцію до цього зниження [2]. Крім того, відповідно до Монреальського протоколу, галогеновмісні гази (HFC, PFC, SF6) поступово припиняються через їх роль у руйнуванні озону.

Двома основними антропогенними (спричиненими діяльністю людини) джерелами викидів CO_2 у всьому світі є спалювання викопного палива та зміни у землекористуванні, головним чином вирубка лісів.

В даний час приблизно 75% глобальних викидів CO_2 є результатом спалювання викопного палива на перетворення та використання енергії, хоча частка різна по регіонах [3].

Тому енергетичний сектор слід розглядати як центральну точку будь-яких викидів стратегія скорочення.

Далі увага приділяється особливо викидам в енергетичному секторі наголос на спалюванні викопного палива для діяльності, пов'язаної з енергетикою.

Походження викидів CO_2 від спалювання викопного палива в ЄС показано на рис. 3.). На виробництво електроенергії та транспорт припадає приблизно одна третина викидів CO2 від спалювання викопного палива, хоча їхня залежність від типу палива чітко відрізняється від того, що остання практично виключно покладається на нафту. Тому що викид Джерел у транспорті, промисловості та опаленні багато, розосереджені та малі, тоді як дим газові потоки електростанцій нечисленні та великі, технологічні рішення до зменшення викидів від виробництва електроенергії має більший вплив, ніж в інших секторах.

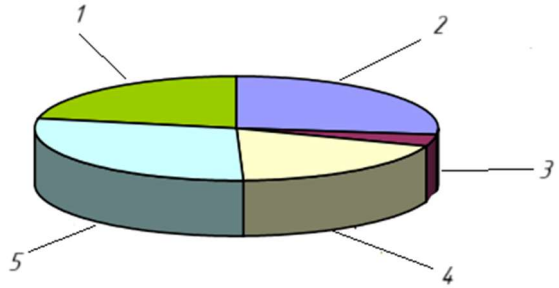


Рис. 3. Викиди CO_2 за секторами в ЄС у 1997 році:
1 – третинний/побутовий 22%;
2 – теплова електроенергетика 27%;
3 – виробництво теплової енергії 4%;
4 – промисловість 19%; 5 – транспорт

Споживання енергії за видами палива для виробництва електроенергії показано на рисунках 4-6. На рисунках 4 і 5 показано частку різних типів палива з точки зору «первинної» енергії одиниці Mtoe (мегатонна нафтового еквівалента), Quad (квадрильйони Btu = 1015 британських теплових одиниць), або Джоуль. Подібна частка видів палива випливає з їх частки в річному виробництві електроенергії, вираженої в ТВт-год. (Відношення споживання первинної енергії до потужності виробництва є (безрозмірним) середнім валовим питомим споживанням палива, тоді як обернена середня ефективність виробництва електроенергії).

На рис.6. показані основні відмінності у векторах енергії для виробництва електроенергії різні регіони світу. Ці відмінності є чітко очікується, що призведе до різної кількості викидів CO_2.

Тому що рівні викидів CO_2 від джерел енергії, не пов'язаних з використанням викопного палива, є низькими походять від самого процесу виробництва або перетворення енергії, а скоріше від будівництва, наступний розділ зосереджується на викидах від викопного палива рослини.

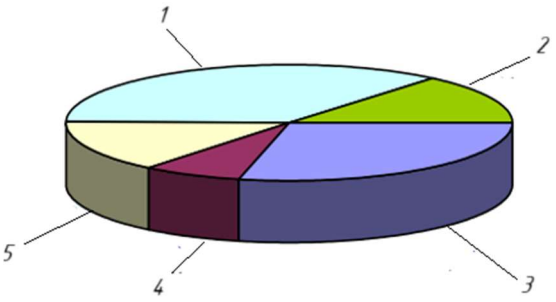


Рис. 4. Витрати енергії на виробництво електроенергії паливом в ЄС у 1997 році:
1 – ядерні 35%;
2 – відновлювані джерела енергії 14%;
3 – вугілля 29%; 4 – масло 9%;
5 – природній газ 15%

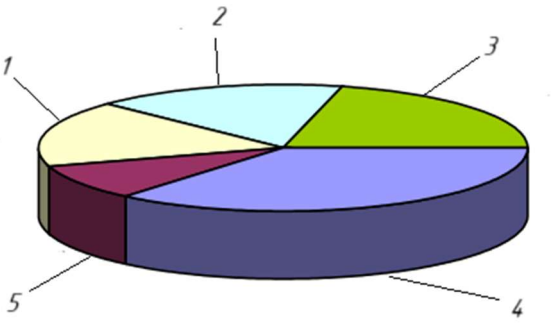


Рис. 5. Витрати енергії на виробництво електроенергії паливом в світ у 1997 році:
1 – ядерні 17%;
2 – відновлювані джерела енергії 21%;
3 – вугілля 36%; 4 – масло 7%;
5 – природній газ 17%

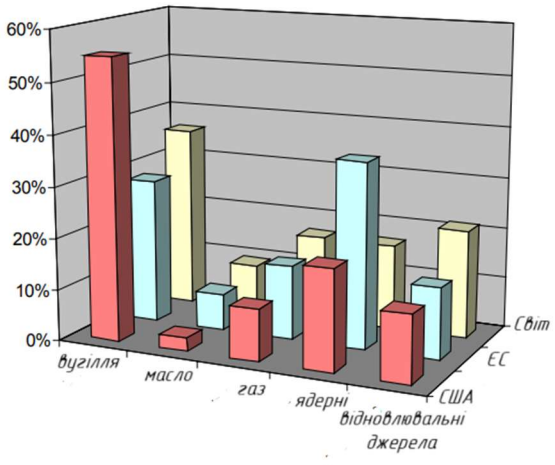


Рис. 6. Витрати енергії на виробництво електроенергії за видами палива у 1997р.

За прогнозами, використання природного газу для виробництва електроенергії буде одним із найшвидших зростаючі сегменти світового енергетичного ринку. У всьому світі очікується, що природний газ виросте з 27% викопного палива, спожитого для виробництва електроенергії в 1997 році, до 37 % у 2025 році [3]. Хоча прогнозується, що вугілля залишиться домінуючим паливом для електростанції, прогнози значних запасів природного газу та відносно низьких цін зробив його кращим паливом для багатьох виробників електроенергії в усьому світі. У промислово розвинених країнах, за помітним винятком Японії та Франції, прогнозована тенденція відходить від ядерної електроенергії та природного газу. У країнах, що розвиваються, вугілля все ще демонструє найбільше збільшиться між 1997 і 2020 роками, але очікується, що використання природного газу для виробництва електроенергії збільшити втричі [3]

Зміни у споживанні енергії для виробництва електроенергії за допомогою викопного палива між 1997 р і 2024 для світу та ЄС показано на рис. 7. Вони враховуючи лише внесок виробництва теплової енергії.

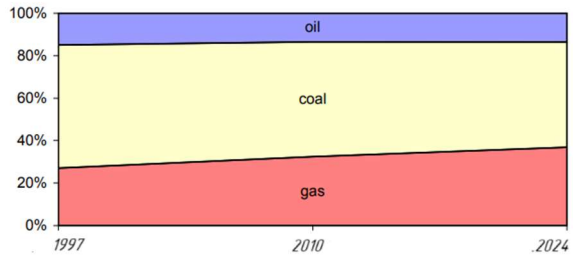


Рис. 7. Еволюція частки виду палива у виробництві електроенергії в світі

Підвищення ефективності впливає як на технологію перетворення, так і на кінцеве використання, увага тут приділяється лише стороні пропозиції, тобто підвищенню ефективності процес перетворення. Тому запропоновані підходи до скорочення викидів на стороні пропозиції включають декілька пунктів: [4]

• більш ефективне перетворення викопного палива (1% підвищення ефективності = 2,5% зниження CO_2 викиди, рис. 8),

• перехід на низьковуглецеве паливо (заміна вугілля природним газом: до 50% зменшення, див. таблицю 2 і рис. 14),

• декарбюрізація димових газів і палива (зниження до 85%),

• зберігання CO_2,

• перехід на атомну енергетику (фактична ліквідація),

• перехід на відновлювані джерела енергії (фактична елімінація).

Кожен із цих варіантів має власні унікальні риси, які визначають економічну ефективність, а також соціальну та політичну підтримку. Слід враховувати як витрати, так і вплив на довкілля, базуючись на повному аналізі життєвого циклу (рис.9).

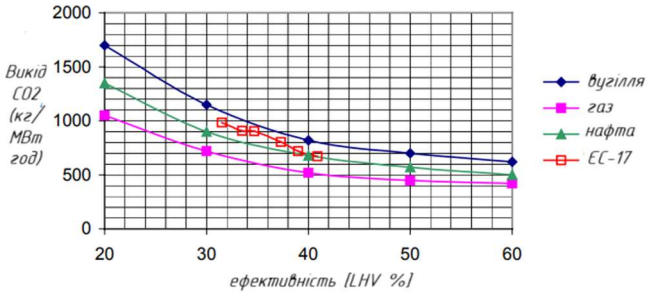


Рис. 8. Викиди CO_2 проти ефективності

Незамкнені символи на рис. 8 представляють тенденцію, отриману з еволюції загальних викидів CO_2 та середньої ефективності виробництва теплової енергії в ЄС-17 (ЄС-15). за період 1970-1996 (дані вимірювань) та прогнози на 2000 та 2010 роки (останні два пункти) [16]. Ці дані яскраво демонструють заслуга підвищення ефективності виробництва теплової енергії для скорочення викидів CO_2.

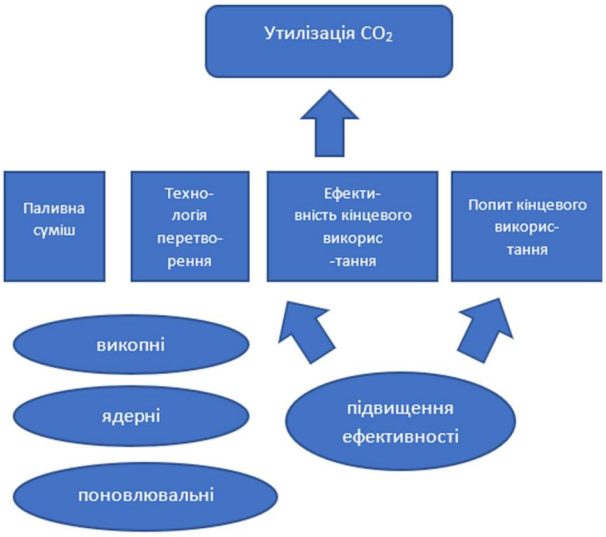


Рис. 9. Схематичне зображення можливостей зменшення CO_2

Огляд потенційного внеску варіантів скорочення викидів CO_2 від усіх секторів показано на рисунку 10 [6]. На цьому графіку

показано кумулятивні світові викиди CO_2 скорочення, виражені як С-еквіваленти, у період 1990-2100 порівняно з BAU (бізнес як зазвичай), який призведе до кумулятивних викидів 1600 Гт С. На рисунку також показано, що для чистого загального очікуваного скорочення приблизно на 1000 Гт С найбільше внесок походить від заміни палива з вищим вмістом С на паливо з низьким вмістом С (в енергетиці генерація, транспорт, опалення та промисловість), а також потенціал скорочення викидів підвищення ефективності (попит і пропозиція разом) приблизно дорівнює відновлювана енергія. Загальне зниження потрапляє в діапазон 800-1100 Гт С, необхідний для сценарій BAU для досягнення стабілізації CO_2 на рівні 450 частин на мільйон до 2100 року.

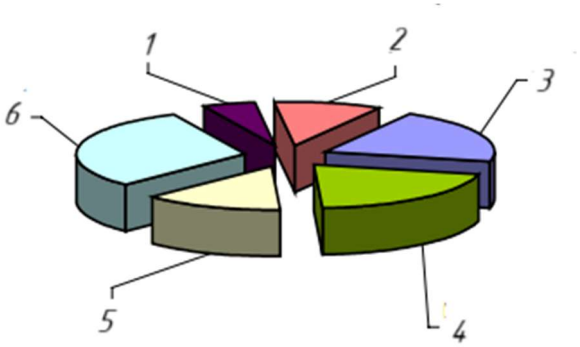


Рис. 10. Варіанти скорочення викидів CO_2 (загалом 980 Гт С):
1 – залісення 5%;
2 – відновлення та зберігання CO_2 10%;
3 – підвищення енерго- та матеріалоефективності 20%; 4 – відновлювана енергія 20%;
5 – атомна енергетика 13%;
6 – перехід на викопне паливо 32%

Висновки. Згідно з науковими дослідженнями, навіть незначна кількість вуглекислого газу здатна бути отруйною та спричиняти біохімічні зміни в крові людини, біль у суглобах, слабкість, порушення кислотно-лужної рівноваги, зниження імунітету, ставати причиною захворювань нирок та серцево-судинної системи.

У результаті цього в світі почала формуватися кліматична політика, націлена на боротьбу зі змінами клімату та декарбонізацію економіки, що знайшло своє відображення в "Європейській зеленій угоді" та Паризькій угоді 2015 року.

Більше половини скорочення викидів відбувається завдяки використанню екологічно чистої електроенергії, йдеться у звіті. Згідно з галузевими даними, у 2023 році ЄС побудував рекордну кількість сонячних панелей і вітрових турбін, а також зміг виробляти більше електроенергії з дамб і атомних електростанцій, які постраждали від посухи і ремонтних робіт роком раніше.

Зниження попиту на електроенергію, якому сприяла гарна погода, спричинило 8% скорочення викидів викопного CO_2. Скорочення в таких секторах, як промисловість - де високі ціни на газ змусили деякі компанії стати більш ефективними, а інші - виробляти менше товарів - і транспорт склали решту 36%. Ці цифри не включають такі сектори, як сільське господарство, брудні хімічні процеси, такі як виробництво цементу, або інші парникові гази, такі як метан. Аналітики кажуть, що загальні викиди все ще знижуються надто повільно.

Література

1. IPCC (2022), Emissions Trends and Drivers. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.004
2. Jia, G., E. Shevliakova, P. Artaxo, N. De Noblet-Ducoudré, R. Houghton, J. House, K. Kitajima, C. Lennard, A. Popp, A. Sirin, R. Sukumar, L. Verchot, 2019: Land–climate interactions. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M, Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. https://doi.org/10.1017/9781009157988.004
3. U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2021, (February 2021), www.eia.gov/aeo
4. R. Dones, X. Zhou, C. Tian, "Life cycle assessment", in Integrated assessment of sustainable energy systems in China — The China Energy Technology Program, B. Eliasson, Y.Y. Lee (Eds.), Kluwer, 320-444 (2003).
5. J.F. Van de Vate, L. Gagnon, "Greenhouse gas emissions from hydropower — The state of research in 1996". Energy Policy, 25(1), 7-13 (1997).
6. R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.J. Althaus, G. Doka, R. Dones, S. Hellweg, R. Hischier, T. Nemecek, G. Rebitzer, M. Spielmann, "Overview and Methodology — Data v1.01", Swiss Centre for Life

Cycle Inventories, Duebendorf, Switzerland. www.ecoinvent.ch (2003).
7. R. Dones, X. Zhou, C. Tian, “Life cycle assessment”, in Integrated assessment of sustainable energy systems in China — The China Energy Technology Program, B. Eliasson, Y.Y. Lee (Eds.), Kluwer, 320-444 (2003).

Melkonova I.V., MelkonovH.L. Greenhouse gas emissions from fossil fuel-based power generation systems

Global warming is a recognized threat to the stability of the Earth’s climate. The only way to control global warming is to control the concentration of greenhouse gases in the atmosphere. There are only two ways to do this: replace high-carbon fuels with low-carbon or carbon-free fuels; and produce and use energy more efficiently. The concentration of carbon dioxide in the atmosphere has reached its maximum level for the first time in human history, and 67% of greenhouse gas emissions are caused by energy and the burning of fossil fuels. High levels of carbon dioxide were observed about 3-5 million years ago, when the Earth’s temperature was several degrees higher than it is now. In particular, in 2018 this figure was 405.5 ppm. Usually the amount of CO_2 varies depending on the season, with the highest values recorded in the northern hemisphere in spring and early summer. However, the average annual concentration of CO2 is steadily increasing. Scientists attribute this to the use of solid fuels, since 67% of greenhouse gas emissions are caused by energy and the burning of fossil fuels, which leads to an increase in the average global temperature. Given the urgent need to strengthen environmental control over the state of the air, and to find ways to reduce the concentration of CO2 in the atmosphere, it is necessary to find new ways to solve this situation and develop monitoring systems for controlling atmospheric emissions. These measures will allow to significantly reduce the volume of emissions into the atmosphere. Compared with Carbon Brief's emission inventory results, the average percentage difference of our algorithm in China is 22.15 %, while the average percentage difference of the OCO-3 Snapshot Area Mapping Observation Model (SAM) is only 6.11 %. In the U.S., the average percentage difference compared to the hourly emission inventory data EPA (the US Environmental Protection Agency) reaches 16.67 %. This result coincides with the average deviation of 15.1 % in the Gaussian plume model for the U.S. power plants. In the European thermal power plant emission estimates, the average percentage difference is about 25 % lower compared to the proxy emission values. Sensitivity tests on planetary boundary layer heights (PBLH), the derived regional background, and wind speeds suggest our divergence method is quite robust. This has been demonstrated to be a quick and effective method for estimating carbon emissions from coal-fired power plants.

Key words: ecology, carbon dioxide, fossil fuels, electricity, gases, emissions.

Мелконова Інна Вікторівна – к.т.н., доц., завідувачка кафедрою електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, melkonova@snu.edu.ua
Мелконов Г.Л. – к.т.н., доц., завідувач кафедрою механізації сільського господарства Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, g.melkonov@snu.edu.ua

Стаття подана 18.02.2025.

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-46-56

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДУ ГРОХОТА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ

Моркун В.С., Моркун Н. В., Грищенко С.М., Грищенко Я.О.

MODELING OF THE COMBINED ELECTROMAGNETIC AND ELECTROMECHANICAL DRIVE OF THE SCREEN TO INCREASE ITS EFFICIENCY

Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Hryshchenko Ya.O.

Розглянуто проблему підвищення ефективності класифікації часток подрібненої руди за крупністю в процесі її збагачення шляхом застосування для реалізації цієї операції грохота тонкого грохочення з комбінованим приводом і визначення основних закономірностей впливу параметрів вібрації просіювальної поверхні на основні характеристик процесу. Виконано теоретичний аналіз та комп'ютерне моделювання процесу тонкого грохочення рудного матеріалу. Грохот, як класифікуючий технологічний агрегат у процесі збагачення руди, розділяє вхідний подрібнений продукт за крупністю його частинок. Розглянуто динаміку як просіювальної поверхні, так і закономірності руху та взаємодії часток подрібненої руди. При моделюванні просіювальної поверхні грохота динаміку його вузлів доцільно представити у вигляді сукупності елементарних блоків, що включають елементи пружності, демпфування та маси. До основних статистичних параметрів, що описують характеристики контактних сил і силового ланцюга між частинками рудного матеріалу в процесі їх грохочення слід віднести співвідношення компонентів силового ланцюга та контактний кут. Доведено, що результати процесу вібраційного грохочення обумовлені зв'язками між параметрами вхідного рудного матеріалу, швидкістю транспортування, ефективністю просіювання та параметрами вібрації матеріалів. Параметрами вібрації визначено нахил поверхні екрана, кут вібрації, частоту та амплітуду вібрації. Показниками оцінки якості скринінгу є ефективність просіювання та швидкість транспортування рудного матеріалу. Досліджені залежності динаміки поверхні вібросита та частинок просіюваної руди використані при моделюванні руху грохота з комбінованим електромагнітним та електромеханічним приводом. Рух та взаємодія частинок рудного матеріалу на грохоті виражені через вектори розгалуження та орієнтації контактних сил. Отримано аналітичні вирази зв'язку швидкості транспортування рудного матеріалу і ефективності грохочення від кута вібрації просіювальної поверхні, які з високою вірогідністю відображають зазначені залежності.

Ключові слова: *грохот, вібрація, параметри, електромагнітний перетворювач, моделювання.*

Вступ. В процесі підготовки рудної сировини до металургійного переділу вона піддається дробленню, подрібненню, класифікації, сепарації та іншим технологічним операціям. Метою цих операцій є вилучення корисного компонента із видобутої руди та позбавлення кінцевого продукту від шкідливих домішок. Технологічний процес збагачувальних фабрик вимагає періодичної класифікації проміжних продуктів збагачення рудного матеріалу за крупністю її часток. Перспективним напрямком підвищення ефективності та продуктивності цієї операції є застосування грохотов тонкого грохочення. На багатьох збагачувальних фабриках вже доведено переваги тонкого грохочення руди: ефективним поділ її часток за крупністю, підвищення продуктивності, покращення якості продукту, зниження витрат на воду, зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище, поліпшення безпеки експлуатації. Разом з цим слід зазначити, що досягнення цих переваг

значною мірою залежить від якісного налаштування параметрів грохочення до характеристик сировини, що класифікується, із відповідним врахуванням її фізико-механічних характеристик та особливостей структурно-текстурного складу. Зазначене налаштування досягається регулюванням характеристик як існуючого віброприводу просіювальної поверхні, так і застосуванням додаткових силових впливів.

Об'єктом дослідження є процес тонкого грохочення подрібненої руди для класифікації за крупністю її часток.

Предмет дослідження математичні та комп'ютерні моделі процесу просіювання рудного матеріалу на грохотах з комбінованим електромагнітним та електромеханічним приводом.

Мета роботи дослідження динаміки руху просіювальної поверхні та часток подрібненої руди для обґрунтування застосування грохоту тонкого грохочення руди з комбінованим вібраційним приводом, а також визначення залежності якості та продуктивності процесу від параметрів вібрації.

Викладання основного матеріалу. Класифікація рудної сировини в гірничопереробній промисловості виконувалась переважно гідроциклонами протягом десятків років. Раніше механічні класифікатори використовувалися у замкнених контурах мокрого помелу руди, а потім вони замінювалися гідроциклонами, як більш економічно ефективними агрегатами. Гідроциклони здатні працювати з високим навантаженням на невеликій площі, можуть добре справлятися з різними технологічними збуреннями та мають низькі капітальні витрати. Тому кульовий млин у замкнутому циклі з гідроциклонами став найпоширенішою структурою на підприємствах збагачення корисних копалин. До недавнього часу сита мало використовувалися в схемах подрібнення через проблеми засліплення та вимог до великої площі поверхні. Однак прогрес у високочастотних механізмах і просіювальних поверхнях з дуже малими отворами певною мірою подолав ці проблеми, і зараз вже є багато прикладів успішного застосування грохотів тонкого грохочення для підвищення ефективності процесу збагачення руди [1].

Існує безліч моделей, які використовують на підприємствах для сухого і мокрого грубого грохочення руди. Але сучасні моделі не в змозі адекватно симулювати складний процес тонкого грохочення. Крім того актуальною проблемою залишається визначення оптимальних режимів і параметрів процесу просіювання руди та розроблення ефективних методів їх досягнення.

В роботі [2] надано опис сучасної технологію тонкого грохочення, яка дозволяє досягти максимальної ефективності для частинок подрібненої руди розміром до 45 мікрон. Зазначено, що більш ніж у 100 установках по всьому світу, високочастотний тонкий грохот Derrick довів свою здатність забезпечувати високу ефективність і продуктивність для мокрого сортування вугілля. Результатами промислової експлуатації доведено, що 150-мікронні просіювальні панелі у промислових умовах служать більше 12 місяців при безперервному використанні. Також досліджуються нові застосування тонкого грохочення, такі як, наприклад, заміна класифікаційних гідроциклонів. Імітаційне моделювання показує, що у деяких випадках сита можна використовувати як альтернативу флотації та досягати при цьому подібного вилучення та якості продуктів із значно меншими капітальними та експлуатаційними витратами.

Разом з тим, автори роботи [3], описуючи грохоти різних виробників, звертають увагу не деякі їх негативні властивості: швидкий знос клиноподібних колосників, та забивання щілин. Ці недоліки знижує вихід тонких класів в підрешітний продукт і вимагають частої зупинки грохотів для очищення або заміни сит. У результаті детального аналізу обладнання для тонкого грохочення зазначається, що сита високочастотних грохотів мають підвищений коефіцієнт живого перетину і збільшені можливості щодо самоочищення від важких зерен.

Необхідність підвищення якості продуктів збагачення рудної сировини потребує вдосконалення існуючих технологічних схем, у тому числі, за рахунок використання нового, більш ефективного обладнання. Для оптимізації підготовки тонковкраплених руд до збагачення у роботі [4] пропонується процес попередньої гідравлічної класифікації подрібнених руд у технологічному тандемі плоскодонний гідроциклон – багаточастотний грохіт. Зазначається, що такий тандем забезпечує збільшення сумарної продуктивності обладнання, високе вилучення дрібних класів у підрешітний продукт, збільшення терміну

служби тонких сит, зменшення витрат води на зрошення надрешітного продукту.

У роботі [5] досліджено вплив параметрів грохочення на загальну ефективність процесу. Доведено, що зі збільшенням часу грохочення вихід малосортних продуктів поступово зменшувався, а середньозважений розмір частинок наближався до заданого розміру отворів грохота. Крім того, досліджено еволюція ефекту скринінгу з часом при різних частотах збудження. Зі збільшенням часу скринінгу ефективність скринінгу зростає, а загальна кількість недоречних матеріалів зменшується. При частоті вібрації 16,5 Гц мінімальний вміст загальної кількості неякісно класифікованих матеріалів становить 4,68%, а оптимальна ефективність просіювання досягає 89,55% [5]. Зазначається, що заміна гідроциклонів на високочастотні грохоти дозволила отримати такі результати: збільшення на 13% пропускної здатності та зменшення на 15% енергії подрібнення у млинах замкненого циклу [1].

У роботі [6] досліджено характеристики руху грохота та механізми просіювання матеріалу, що класифікується. Отримані результати свідчать про те, що ефективність скринінгу залежить від того як матеріал рухається та розділяється на частинки і як частинки контактують одна з одною. Процес скринінгу матеріалу на еліптичному вібраційному грохоті змодельовано за допомогою методу дискретних елементів. Аналіз показав, що якщо порівнювати продуктивність скринінгу різних траєкторій руху просіювальної поверхні, то саме грохот з еліптичним рухом показує найкращі результати.

У роботі [7] досліджено вплив параметрів вібрації на процес скринінгу. Встановлені взаємозв'язкі між зазначеними параметрами, швидкістю транспортування матеріалів та ефективністю просіювання формують базу даних для моделювання і аналізу процесу класифікації еліптичної вібраційної машини. Зроблено висновок, що за умов, коли нахил поверхні грохота та параметри вібрації змінюється у певних межах, можна забезпечити найвищу швидкість транспортування та ефективність просіювання матеріалів одночасно.

З наведеного можна зробити висновок, що застосування грохотів тонкого грохочення руди для класифікації подрібненої руди за крупністю її часток є перспективним напрямом підвищення продуктивності збагачувальних фабрик та покращення якості їх продукції. Про те наявні проблемні питання, що виникають при їх експлуатації, потребують додаткових досліджень закономірностей динаміки поверхні вібросита та частинок просіюваної руди, визначення залежності ефективності грохочення від параметрів вібрації сита та удосконалення моделі процесу. Також актуальним питанням є розроблення методів, спрямованих на покращення керування процесом грохочення [8].

Для визначення основних характеристик процесу грохочення рудного матеріалу його модель має враховувати динаміку як просіювальної поверхні, так і закономірності руху і взаємодії часток подрібненої руди [9, 10].

Модель просіювальної поверхні грохота може бути представлена у вигляді сукупності сіток і вузлів, а рівняння рівноваги для кожного вузла у вигляді [11]

$$M\ddot{u} = P - I, \tag{1}$$

де M - матриця мас кожного вузла; $\ddot{u}$ - прискорення; P - зовнішня сила; I - внутрішня сила елемента.

З урахуванням рівняння (1) прискорення вузла в момент часу t можна обчислити за допомогою формули

$$\ddot{u}|(t) = (M)^{-1}(P - I)(t), \tag{2}$$

У роботі [11] пропонується використовувати метод центральних різниць для вирішення рівняння переміщення шляхом інтегрування швидкості вузла гнучкої ситової плити

$$u|(t + \Delta t) = u|(t) + \Delta t|(t + \Delta t)\dot{u}\left|\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right)\right., \tag{3}$$

Рух та взаємодія частинок рудного матеріалу на грохоті можуть бути виражені через вектори розгалуження та орієнтації контактних сил у вигляді наступної системи [12]

$$\boldsymbol{l} = l_n\boldsymbol{n} + l_t\boldsymbol{t}\,, \tag{4}$$

$$\boldsymbol{f} = f_n\boldsymbol{n} + f_t\boldsymbol{t}\,, \tag{5}$$

де l_n та l_t - нормальна і тангенціальна складові векторів розгалуження; f та f_t — нормальна і тангенціальна складові контактної сили; $\boldsymbol{n}$ - одиничний вектор, перпендикулярний до

площини контакту; $\boldsymbol{t}$ - ортонормальний одиничний вектор (напрямок - проти годинникової стрілки); ($\boldsymbol{n,t}$) - локальний одиничний фрейм.

Для спрощення моделюванні просіювальної поверхні грохота динаміку його вузлів доцільно представити у вигляді сукупності елементарних блоків, що відображають фізичні властивості пружності, демпфування та маси, і представляти їх із застосуванням програмного продукту Simscape Matlab/Simulink® [13].

Результат. Наведені залежності динаміки поверхні вібросита та частинок просіюваної руди використані при моделюванні руху грохота з комбінованим електромагнітним та електромеханічним приводом. Електромагнітна система може бути легко додана до існуючого на більшості грохотів приводу із застосуванням електродвигуна і при цьому надає більше можливостей щодо змін параметрів вібрації та, відповідно, покращення керування характеристиками процесу просіювання.

Результати процесу вібраційного грохочення обумовлені зв'язками між параметрами вхідного рудного матеріалу, швидкістю транспортування, ефективністю просіювання та параметрами вібрації матеріалів. До параметрів вхідного рудного матеріалу віднесено загальну масу, концентрацію твердої фази та його гранулометричний склад. Параметрами вібрації визначено: нахил поверхні екрана, кут вібрації, частоту та амплітуду вібрації.

Показниками оцінки якості скринінгу є ефективність просіювання та швидкість транспортування рудного матеріалу.

Рівняння, застосоване для розрахунку ефективності просіювання, виглядає наступним чином [7]

$$\eta = \frac{m_{Sp}}{m_{St}} \times 100\%\,, \tag{6}$$

де m_{Sp} - загальна маса просіяних частинок у збірній коробці під ситовою пластиною, розмір яких менший за отвір сита; m_{St} - загальну масу частинок у вхідному продукті, розмір яких менший за апертуру екрана.

Швидкість транспортування рудного матеріалу в процесі просіювання визначається рівнянням [7]

$$v = \frac{L}{\bar{t}}\,, \tag{7}$$

де L - довжину пластини сита; $\bar{t}$ - середній час, протягом якого частинки руди рухаються від входу матеріалу до вихідних отворів.

Електромагнітна система комбінованого приводу описується наступними рівняннями [14-16]

$$\begin{cases} \frac{d\boldsymbol{\psi_1}}{\boldsymbol{dt}} + \frac{\boldsymbol{R_1}}{\boldsymbol{L_1}} = \boldsymbol{u_1(t)} \\ \boldsymbol{M}\frac{\boldsymbol{dx^2}}{\boldsymbol{dt^2}} + \boldsymbol{k}\frac{\boldsymbol{dx}}{\boldsymbol{dt}} + \boldsymbol{cx} = \boldsymbol{F(x, i_1)} \end{cases}, \tag{8}$$

де $\boldsymbol{u_1(t)}$, - напруга на обмотках електромагніту; $\boldsymbol{i_1}$- струм в обмотці; $\boldsymbol{L_1}$ - індуктивність електромагніту; $\boldsymbol{R_1}$ – активний опір обмотки; $\boldsymbol{x}$ – рух полотна вібросита з якорем електромагніту; $\boldsymbol{k}$ - коефіцієнт тертя; $\boldsymbol{c}$ - жорсткість пружних елементів; $\boldsymbol{M}$ - вага якоря з прикріпленим полотном вібросита; $\boldsymbol{F(x, i_1)}$ - електромагнітна сила, яка є функцією від струму $\boldsymbol{i_1}$та переміщення $\boldsymbol{x}$.

Індуктивність електромагнітної системи залежить від руху якоря електромагніту і може бути визначена зі співвідношення [14]

$$L_1 = \frac{L_0}{1-\beta\frac{x}{x_0}}\,, \tag{9}$$

де L_0 - індуктивність у середньому положенні якоря; x_0 - середній зазор між якорем і осердям електромагніту; β - коефіцієнт модуляції індуктивності.

Потокозчеплення для ненасиченої магнітної системи з середнім зазором x_0 можна виразити

$$\psi_1 = L_1 i_1. \tag{10}$$

Тоді для тягового зусилля, прикладеного до полотна вібросита маємо:

$$F_1 = \frac{\pi\psi_1\omega}{4U_0 m_0}, \tag{11}$$

де U_0 - постійна складова напруги; m_0 – коефіцієнт варіації напруги.

На рис. 1 наведена схема моделі вібраційного грохота з комбінованим приводом, що використовується для реалізації процесу тонкого грохочення руди. Модель сформована із використанням програмного продукту Simscape Matlab/Simulink® [13].

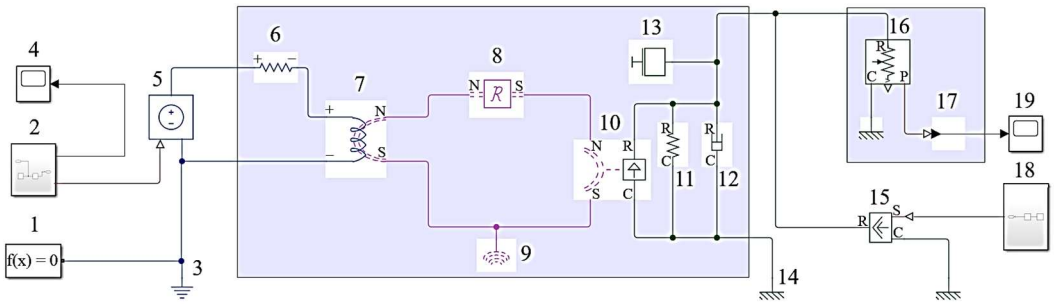


Рис. 1. Схема моделі вібраційного грохота з комбінованим приводом

У наведеній моделі використані наступні блоки: 1- блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 2 – блок формування параметрів електромагнітних імпульсів; 3 - блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements;

4, 19 – блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 5 – блок Controlled Voltage Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 6 – блок Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 7 – блок Electromagnetic Converter із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 8 – блок Reluctance із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 9 – блок Magnetic Reference із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 10 – блок Reluctance Force Actuator із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 11 – блок Translational Spring із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 12 – блок Translational Damper із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 13 – блок Mass із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 14 – блок Mechanical Translational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 15 – блок Ideal Force Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 16 – блок Ideal Translational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 17 – блок PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 18 - блок формування параметрів електромеханічного впливу.

Блок Solver Configuration (конфігурації розв'язувача) визначає параметри розв'язувача, які потрібні моделі перед початком моделювання.

Блок формування параметрів електромагнітних імпульсів – генерує електричні імпульсі обраної форми, амплітуди та тривалості.

Блок Scope відображає сигнали у часової області.

Блок Controlled Voltage Source (керованого джерела напруги) являє собою ідеальне джерело напруги, яке є достатньо потужним, щоб підтримувати задану напругу на своїх клемах незалежно від струму, що протікає через джерело.

Блок Resistor моделює лінійний резистор в електричних системах.

Блок Electromagnetic Converter (електромагнітного перетворювача) забезпечує загальний інтерфейс між електричною та магнітною областями моделі. Блок базується на наступних рівняннях

$$MMF = N \cdot I; \tag{12}$$

$$V = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \tag{13}$$

де MMF - магніторушійна сила на магнітних портах; Φ - потік через магнітні порти; I - струм через електричні порти; V - напруга на електричних портах; N - кількість витків електричної обмотки; t - час моделювання.

Блок Reluctance моделює магнітний опір, тобто компонент, який протистоїть магнітному потоку. Відношення магніторушійної сили на компоненті до результуючого потоку, який протікає через компонент, є постійним, а значення співвідношення визначається як опір. Опір залежить від геометрії ділянки, що моделюється. Блок базується на наступних рівняннях

$$MMF = \Phi \cdot \Re; \tag{14}$$

$$\Re = \frac{g}{\mu_0 \mu_r A}, \tag{15}$$

де MMF - магніторушійна сила на компоненті; Φ - потік через компонент; $\Re$ - опір; g - товщина ділянки, що моделюється; μ_0 - константа проникності; μ_r - відносна проникність матеріалу; A - площа поперечного перерізу секції, що моделюється.

Блок Magnetic Reference блок представляє точку відліку для всіх портів магніту.

Блок Reluctance Force Actuator (приводу сили опору) моделює загальний магніторушійний пристрій на основі сили опору. Блок базується на наступних рівняннях

$$F = -0.5 \cdot \Phi^2 \cdot \frac{d\Re}{dx}; \quad (16)$$

$$\Re(x) = \frac{x}{\mu_0 \mu_r A}; \quad (17)$$

$$u = dx, \quad (18)$$

де F - сила протидії; Φ - потік в магнітопроводі; $\Re$ - опір; x - товщина або довжина повітряного зазору; μ_0 - константа проникності; μ_r - відносна проникність матеріалу; A - площа поперечного перерізу секції, що моделюється; u – швидкість.

Блок Translational Spring являє собою ідеальну механічну лінійну пружину, описану такими рівняннями

$$F = Kx; \quad (19)$$

$$x = x_{init} + x_R - x_c; \quad (20)$$

$$v = \frac{dx}{dt}. \quad (21)$$

де F - сила, що передається через пружину; K - коефіцієнт пружини; x - відносне зміщення (деформація пружини); x_{init} - початкове зміщення пружини (початкова деформація); пружина може бути спочатку стиснутою ($x_{init} > 0$) або розтягнутою ($x_{init} < 0$); x_R, x_c - абсолютні переміщення клем *R* і *C,* відповідно; v - відносна швидкість; *t* – час.

Блок Mass представляє ідеальну механічну поступальну масу, яка описується наступним рівнянням

$$F = m\frac{dv}{dt}, \quad (22)$$

де F - сила інерції; m - маса; v - швидкість; t - час.

Блок Translational Damper являє собою ідеальний механічний поступальний в'язкий демпфер, описаний такими рівняннями:

$$F = Dv; \quad (23)$$

$$v = v_R - v_C, \quad (24)$$

де F - сила, що передається через демпфер; D - коефіцієнт демпфування (в'язкого тертя); v -відносна швидкість; v_R, v_C - абсолютні швидкості терміналів *R* і *C* відповідно.

Блок Mechanical Translational Reference представляє опорну точку або рамку для механічних портів поступального руху.

Блок Ideal Force Source являє собою ідеальне джерело механічної енергії, яке генерує силу, пропорційну вхідному фізичному сигналу. Джерело є ідеальним у тому сенсі, що воно вважається достатньо потужним, щоб підтримувати задану силу на своєму виході незалежно від швидкості на терміналах джерела.

Блок Ideal Translational Motion Sensor являє собою пристрій, який перетворює поперечну змінну, виміряну між двома механічними трансляційними вузлами, у керуючий сигнал, пропорційний прискоренню, швидкості або положенню.

Блок PS-Simulink Converter перетворює фізичний сигнал у вихідний сигнал Simulink®.

Блок формування параметрів електромеханічного впливу формує сигнал, що відповідає роботі приводу із електродвигуном.

Електромагнітний привод вібросита моделюється за допомогою магнітних блоків. Струм через котушку електромагніту створює магніторушійну силу (MMF), яка рухає магнітний сердечник. Створюється сила опору, яка змушує плунжер закривати повітряний зазор. Магнітний потік в магнітопроводі зростає зі зменшенням довжини повітряного проміжку. Блок формування параметрів електромагнітних імпульсів дозволяє легко змінювати їх форму, амплітуду, тривалість та фазу відносно механічних впливів, що формуються блоком Ideal Force Source у відповідності із сигналами з блоку формування параметрів електромеханічного впливу. Пружні властивості вібросита відтворюються налаштуванням параметрів механічної лінійної пружини (блок Translational Spring), механічного поступального в'язкого демпфера (блок Translational Damper) та механічної поступальної маси (блок Mass).

На рис. 2 наведено результати моделювання змін амплітуди переміщення поверхні вібросита у часі від прикладеного електромагнітного впливу з частотою 100 Гц і електромеханічного впливу частотою 10 Гц.

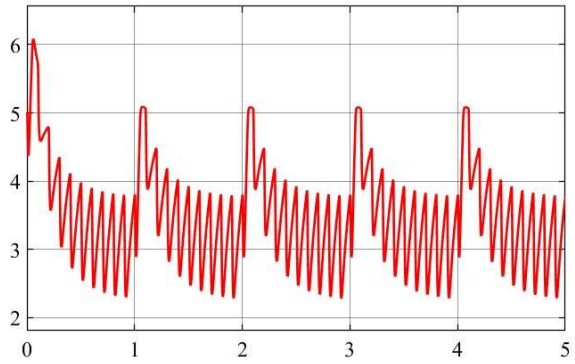


Рис. 2. Амплітуда переміщення (мм) поверхні вібросіта у часі (× 0,1 с)

На рис. 3 наведено результати моделювання дії аналогічних впливів на зміни швидкості переміщення поверхні вібросита.

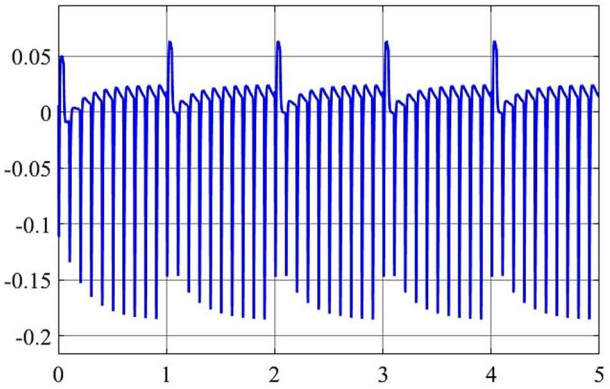


Рис. 3. Швидкість переміщення (м/с) поверхні вібросіта у часі (× 0,1 с)

Таким чином, наведена на рис. 1 модель практично відображає можливості комбінованого віброприводу грохота тонкого грохочення рудного матерілу щодо регулювання амплітуди, частоти та фази коливань просіювальної поверхні.

Наведена на рис. 1 модель використана для дослідження впливу кута вібрації на швидкість транспортування рудного матеріалу і ефективність грохочення. Регулювання кута вібрації реалізується за допомогою технології перетворення частоти і фази коливань, що формуються двома складовими комбінованого приводу.

Досліджено вплив зміни кута вібрації від 20° до 65° на зазначені показники процесу грохочення. На рис. 4 наведено схему регулювання кута вібрації шляхом зміщення напрямку осі коливань.

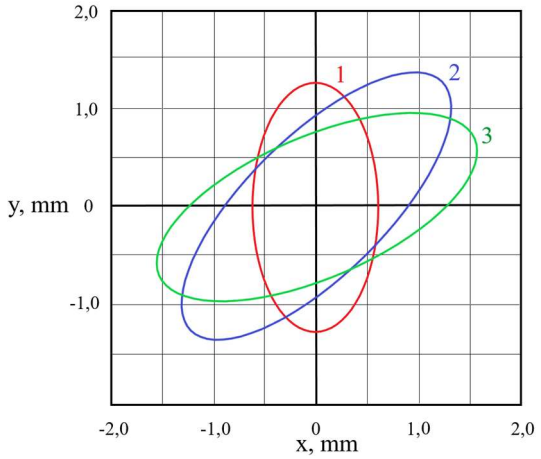


Рис. 4. Регулювання кута вібрації θ:
1 - $\theta_1 = 90°$; 2 - $\theta_2 = 45°$; 3 - $\theta_3 = 23°$

На рис. 5 показано залежність між швидкістю транспортування матеріалів і кутом вібрації, а на рис. 5 – залежність між ефективністю просіювання та кутом вібрації.

Наведена на рис. 6 залежність з вірогідністю R^2 =0,9751 апроксимується наступним виразом

$$Y = 3 \cdot 10^{-8}x^4 - 5 \cdot 10^{-6}x^3 + 0{,}0002x^2 + 0{,}0005x + 0{,}1133\,. \quad (25)$$

Рівняння апроксимації, наведеної на рис. 6 залежності (R^2=0,9826) має наступний вигляд

$$Y = 6 \cdot 10^{-8}x^4 - 10^{-5}x^3 + 0{,}0008x^2 - 0{,}0171x + 0{,}9439. \quad (26)$$

Для порівняльної оцінки запропонованої структури з існуючими приводними системами використані дані, наведені у дослідженнях [7,17]. Отримані результати моделювання грохота тонкого грохочення з комбінованим приводом свідчать про його кращу ефективність у порівнянні з дуальним приводом із застосуванням електродвигунів на 1-2% та збільшену при цьому швидкість транспортування рудного матеріалу на 0,2-0,3 м/с тобто відповідне підвищення продуктивності процесу.

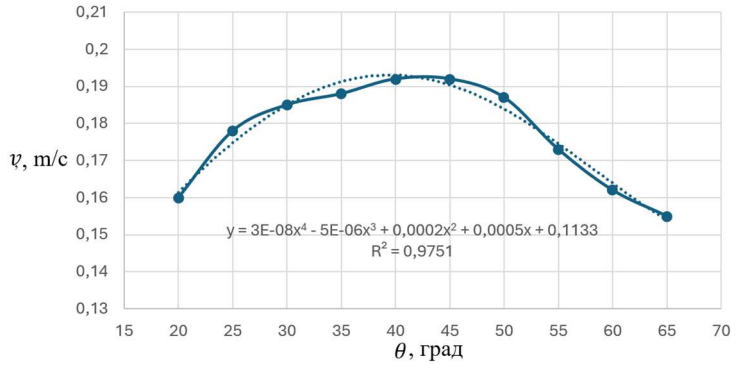


Рис. 5. Залежність швидкості транспортування v рудного матеріалу від кута θ вібрації грохота θ

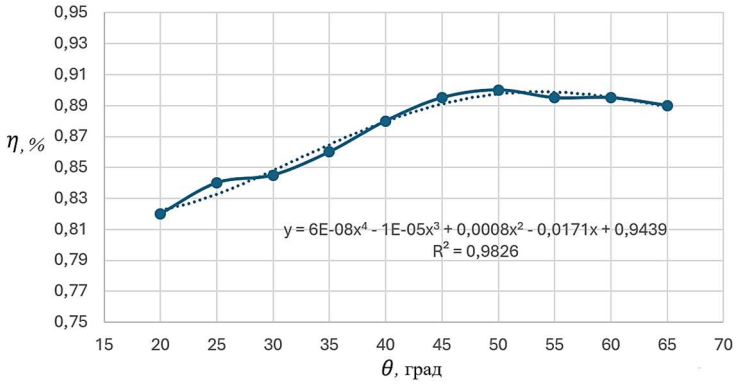


Рис. 6. Залежність ефективності грохочення η від кута вібрації грохота θ

Висновки. Результати процесу вібраційного грохочення обумовлені зв'язками між параметрами вхідного рудного матеріалу, швидкістю транспортування, ефективністю просіювання та параметрами вібрації матеріалів. До параметрів вхідного рудного матеріалу віднесено загальну масу, концентрацію твердої фази та його гранулометричний склад. Параметрами вібрації визначено: нахил поверхні екрана, кут вібрації, частоту та амплітуду вібрації. Процес тонкого грохочення руди відбувається на вібраційних грохотах з електромеханічним приводом на основі одного чи двох електричних двигунів. Така конфігурація приводу обмежує можливості формування ефективної динаміки просіювальної поверхні та часток подрібненої руди в процесі грохочення.

Перспективи подальших досліджень. Напрямком подальших досліджень є визначення додаткових впливів на процес тонкого грохочення руди та вивчення закономірностей їх формування [18].

Література

1. Hakan Dündar. Investigating the benefits of replacing hydrocyclones with high-frequency fine screens in closed grinding circuit by simulation. Minerals Engineering Volume 148, 15 March 2020, 106212. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106212
2. Zhang, Baojie & Wheeler, J & Jain, A & Packer, B. (2016). Improving Fine Coal Recovery with High Efficiency Fine Coal Classification. March 2016. Conference: Australian Coal Preparation Society. https://www.researchgate.net/publication/306032676_Improving_Fine_Coal_Recovery_with_High_Efficiency_Fine_Coal_Classification.
3. Олійник Т.А. Використання тонкого грохочення в умовах ПРАТ ПІВНІЧОГО ГЗК / Олійник Т.А., Скляр Л.В., Олійник М.О., Кушнірук Н.В., Скляр А. Ю., Коржан І.А. // Підготовчі процеси збагачення. Збагачення корисних копалин, 2018. – Вип. 69(110), с. 69-77. http://zzkk.nmu.org.ua/pdf/2018-69-110/9.pdf.
4. Косий Г. М. Розробка та випробування технологічного тандему плоскодонний гідроциклон – багаточастотний гуркіт. - Збагачення руд, 2022, №4. DOI 10.17580/or.2022.04.01.

5. Weinan Wang, Xu Hou, Pengfei Mao, Miao Pan, Sh ijie Yu, Haishen Jiang, Jinpeng Qiao, Chenlong Duan. Kinematic characteristics of key structures and time evolution law of material distribution characteristics during flip-flow screening. -Minerals Engineering, Volume 201, October 2023, 108241. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108241.
6. Zhongjun Yin, Hang Zhang, Tian Han. Simulation of particle flow on an elliptical vibrating screen using the discrete element method. Powder Technology. Volume 302, November 2016, Pages 443-454. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.061.
7. Bing Chen, Jiwei Yan, Wei Mo, Chuanlei Xu, Lijie Zhang, Kumar K Tamma. DEM simulation and experimental study on the screening process of elliptical vibration mechanical systems. - JOURNAL OF VIBROENGINEERING. DECEMBER 2019, VOLUME 21, ISSUE 8. DOI https://doi.org/10.21595/jve.2019.19993
8. Porkuian O. Predictive Control of the Iron Ore Beneficiation Process Based on the Hammerstein Hybrid Model / Olga Porkuian, Vladimir Morkun, Natalia Morkun, Oleksandra Serdyuk // Acta Mechanica et Automatica, 2019, 13(4), P. 262-270. https:// doi.org/ 10.2478/ama-2019-0036.
9. Santos, C.; Urdaneta, V.; García, X.; Medina, E. Compression and shear-wave velocities in discrete particle simulations of quartz granular packings: Improved Hertz-Mindlin contact model. Geophysics 2011, 76, E165–E174.
10. Zhou, J.; Zhang, L.; Hu, C.; Li, Z.; Tang, J.; Mao, K.; Wang, X. Calibration of wet sand and gravel particles based on JKR contact model. Powder Technol. 2022, 397, 117005.
11. Xu, N.; Wang, X.; Lin, D.; Zuo, W. Numerical Simulation and Optimization of Screening Process for Vibrating Flip-Flow Screen Based on Discrete Element Method–Finite Element Method–Multi-Body Dynamics Coupling Method. Minerals 2024, 14, 278. https:// doi.org/10.3390/min14030278.
12. Azema E., Radja F. Force chains and contact network topology in sheared packings of elongated particles. - PHYSICAL REVIEW E 85, 031303 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevE.85.031303
13. Simscape. Model and simulate multidomain physical systems. https://www.mathworks.com/products/simscape.html.
14. Je-Hoon Kim, Jin-Ho Kim1, Sang-Hyun Jeong, Bang-Woo Han. Design and Experiment of an Electromagnetic Vibration Exciter for the Rapping of an Electrostatic Precipitator. - Journal of Magnetics, 17(1), 61-67 (2012). http://dx.doi.org/10.4283/JMAG.2012.17.1.061.
15. Nuraliyev *A.* Ibadullayev. M. Research and development of resonant electromagnetic vibration screen for intensive vibration technologies. E3S Web Conf. Volume 216, 2020. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601114.
16. Merab CHELIDZE, Victor ZVIADAURI, Tamaz NATRIASHVILI. SOME PROBLEMS WITH THE MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC VIBRATORS USED FOR TRANSPORTING BULK MATERIALS. - TRANSPORT PROBLEMS 2022 Volume 17 Issue 5. DOI: 10.20858/tp.2022.17.4.05.
17. A. N. Mwale, A. N. Mainza, P. A. Bepswa, S. Simukanga, J. Masinja. MODEL FOR FINE WET SCREENING. - IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings - ISBN: 978-1-926872-29-2 https://www.researchgate.net/publication/315586805_MODEL_FOR_FINE_WET_SCREENING.
18. Morkun V. S. Automatic control of the ore suspension solid phase parameters using high-energy ultrasound / Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V. // Radio electronics computer science control. – Vol. 3, - 2017. - P. 175-182. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-3-19.

References

1. Hakan Dündar. Investigating the benefits of replacing hydrocyclones with high-frequency fine screens in closed grinding circuit by simulation. Minerals Engineering Volume 148, 15 March 2020, 106212. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106212
2. Zhang, Baojie & Wheeler, J & Jain, A & Packer, B. (2016). Improving Fine Coal Recovery with High Efficiency Fine Coal Classification. March 2016. Conference: Australian Coal Preparation Society. https://www.researchgate.net/publication/306032676_Improving_Fine_Coal_Recovery_with_High_Efficiency_Fine_Coal_Classification.
3. Oliinyk T.A. Vykorystannia tonkoho hrokhochennia v umovakh PRAT PIVNIChOHO HZK / Oliinyk T.A., Skliar L.V., Oliinyk M.O., Kushniruk N.V., Skliar A. Yu., Korzhan I.A. // Pidhotovchi protsesy zbahachennia. Zbahachennia korysnykh kopalyn, 2018. Vyp. 69(110), S. 69-77. http://zzkk.nmu.org.ua/pdf/2018-69-110/9.pdf.
4. Kosyi H. M. Rozrobka ta vyprobuvannia tekhnolohichnoho tandemu ploskodonnyi hidrotsyklon – bahatochastotnyi hurkit. - Zbahachennia rud, 2022, №4. DOI 10.17580/or.2022.04.01.
5. Weinan Wang, Xu Hou, Pengfei Mao, Miao Pan, Shijie Yu, Haishen Jiang, Jinpeng Qiao, Chenlong Duan. Kinematic characteristics of key structures and time evolution law of material distribution characteristics during flip-flow screening. - Minerals Engineering, Volume 201, October 2023, 108241. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108241.
6. Zhongjun Yin, Hang Zhang, Tian Han. Simulation of particle flow on an elliptical vibrating screen using the discrete element method. Powder Technology. Volume 302, November 2016, Pages 443-454. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.061.
7. Bing Chen, Jiwei Yan, Wei Mo, Chuanlei Xu, Lijie Zhang, Kumar K Tamma. DEM simulation and experimental study on the screening process of

elliptical vibration mechanical systems. - JOURNAL OF VIBROENGINEERING. DECEMBER 2019, VOLUME 21, ISSUE 8. DOI https://doi.org/10.21595/jve.2019.19993
8. Porkuian O. Predictive Control of the Iron Ore Beneficiation Process Based on the Hammerstein Hybrid Model / Olga Porkuian, Vladimir Morkun, Natalia Morkun, Oleksandra Serdyuk // Acta Mechanica et Automatica, 2019, 13(4), P. 262-270. https:// doi.org/ 10.2478/ama-2019-0036.
9. Santos, C.; Urdaneta, V.; García, X.; Medina, E. Compression and shear-wave velocities in discrete particle simulations of quartz granular packings: Improved Hertz-Mindlin contact model. Geophysics 2011, 76, E165–E174.
10. Zhou, J.; Zhang, L.; Hu, C.; Li, Z.; Tang, J.; Mao, K.; Wang, X. Calibration of wet sand and gravel particles based on JKR contact model. Powder Technol. 2022, 397, 117005.
11. Xu, N.; Wang, X.; Lin, D.; Zuo, W. Numerical Simulation and Optimization of Screening Process for Vibrating Flip-Flow Screen Based on Discrete Element Method–Finite Element Method–Multi-Body Dynamics Coupling Method. Minerals 2024, 14, 278. https:// doi.org/10.3390/min14030278.
12. Azema E., Radja F. Force chains and contact network topology in sheared packings of elongated particles. - PHYSICAL REVIEW E 85, 031303 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevE.85.031303
13. Simscape. Model and simulate multidomain physical systems. https://www.mathworks.com/products/simscape.html.
14. Je-Hoon Kim, Jin-Ho Kim1, Sang-Hyun Jeong, Bang-Woo Han. Design and Experiment of an Electromagnetic Vibration Exciter for the Rapping of an Electrostatic Precipitator. - Journal of Magnetics, 17(1), 61-67 (2012). http://dx.doi.org/10.4283/JMAG.2012.17.1.061.
15. Nuraliyev *A.* Ibadullayev. M. Research and development of resonant electromagnetic vibration screen for intensive vibration technologies. E3S Web Conf. Volume 216, 2020. Rudenko International Conference "Methodological problems in reliability study of large energy systems" (RSES 2020). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601114.
16. Merab CHELIDZE, Victor ZVIADAURI, Tamaz NATRIASHVILI. SOME PROBLEMS WITH THE MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC VIBRATORS USED FOR TRANSPORTING BULK MATERIALS. - TRANSPORT PROBLEMS 2022 Volume 17 Issue 5. DOI: 10.20858/tp.2022.17.4.05.
17. A. N. Mwale, A. N. Mainza, P. A. Bepswa, S. Simukanga, J. Masinja. MODEL FOR FINE WET SCREENING. - IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings - ISBN: 978-1-926872-29-2. https://www.researchgate.net/publication/315586805_MODEL_FOR_FINE_WET_SCREENING.
18. Morkun V. S. Automatic control of the ore suspension solid phase parameters using high-energy ultrasound / Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V. // Radio electronics computer science control. – Vol. 3, - 2017. - P. 175-182. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-3-19.

Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Hryshchenko Ya.O. Modeling of the combined electromagnetic and electromechanical drive of the screen to increase its efficiency.

The paper considers the problem of increasing the efficiency of classification of crushed ore particles by size in the process of its beneficiation by using a fine screen with a combined drive for this operation and determining the main regularities of the influence of the screening surface vibration parameters on the main characteristics of the process. A theoretical analysis and computer modeling of the process of fine screening of ore material were performed. The screen, as a classifying technological unit in the process of ore dressing, separates the input crushed product by the size of its particles. The dynamics of both the screening surface and the patterns of movement and interaction of crushed ore particles are considered. When modeling the screening surface of a screen, it is advisable to represent the dynamics of its components as a set of elementary blocks, including elements of elasticity, damping, and mass. The main statistical parameters that describe the characteristics of contact forces and the power chain between ore particles in the process of their screening include the ratio of the components of the power chain and the contact angle.It is proved that the results of the vibration screening process are determined by the relationships between the parameters of the input ore material, transportation speed, screening efficiency, and vibration parameters of the materials. Vibration parameters include the slope of the screen surface, vibration angle, vibration frequency, and vibration amplitude. The screening quality assessment indicators are screening efficiency and ore material transportation rate. The studied dependences of the dynamics of the vibrating screen surface and the particles of the screened ore were used to model the motion of a screen with a combined electromagnetic and electromechanical drive. The motion and interaction of ore particles on the screen are expressed through the branching vectors and orientation of contact forces. Analytical expressions for the relationship between the rate of transportation of ore material and screening efficiency and the angle of vibration of the screening surface have been obtained, which reflect these dependencies with high reliability.

Keywords: *screen, vibration, parameters, electromagnetic transducer, modeling.*

Моркун Володимир Станіславович – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Ріг), morkunv@gmail.com.
Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівський національний університет імені Івана Франка (ЛЬвів), nmorkun@gmail.com.
Грищенко Світлана Миколаївна – к.пед.н., старший дослідник, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету (Ірпінь), smgrischenko@gmail.com.
Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischenckokgtl@gmail.com.

Стаття подана 30.01.2025.

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-57-66

УДК: 541.124

ЗАСТОСУВАННЯ ЯВИЩА КАВІТАЦІЇ І КАВІТАЦІЙНОГО РЕАКТОРУ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЕСТЕРИФІКАЦІЇ

Андреєв М.С., Столяренко Г.С.

APPLICATION OF CAVITATION PHENOMENON AND CAVITATION REACTOR FOR INTENSIFICATION OF THE ESTERIFICATION PROCESS

Andreiev M.S., Stolyarenko G.S.

У статті досліджено використання явища кавітації для покращення процесу естерифікації, що відіграє важливу роль у хімічній та нафтохімічній промисловості. Розглянуто механізми формування кавітаційних бульбашок, їх вплив на фізико-хімічні характеристики середовища та прискорення реакцій у рідинних системах. Показано переваги кавітаційного реактора для удосконалення технологічних процесів, що сприяє підвищенню продуктивності та зниженню енергетичних витрат.

Естерифікація є поширеним способом синтезу складних ефірів, які знаходять застосування в органічному синтезі, виробництві біопалива, харчовій, косметичній та фармацевтичній галузях. Традиційні методи естерифікації вимагають значних енергетичних витрат та каталізаторів для ефективного перебігу реакцій. У роботі доведено, що використання кавітаційних явищ сприяє інтенсивнішому змішуванню реагентів, розриву міжмолекулярних зв'язків, підвищенню ефективності каталізу та скороченню тривалості процесу.

Розглянуто різні типи кавітаційних реакторів, серед яких гідродинамічні, ультразвукові та акустичні системи, а також їхній вплив на ефективність естерифікації. Наведено результати експериментальних досліджень, які демонструють, що застосування кавітації забезпечує стабільність продуктів реакції, мінімізує утворення побічних продуктів та збільшує вихід кінцевого ефіру. Визначено оптимальні параметри роботи кавітаційного реактора, такі як тиск, частота ультразвукових хвиль, температура та швидкість подачі реагентів.

Крім того, стаття містить аналіз економічної ефективності впровадження кавітаційних технологій у промисловість. Встановлено, що застосування кавітаційних ефектів сприяє значному зменшенню енергоспоживання, скороченню витрат на каталізатори та покращенню екологічних показників виробництва. Обговорено перспективи розвитку цієї технології, зокрема можливість її інтеграції у сучасні виробничі лінії та застосування у суміжних галузях промисловості.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що кавітація є потужним засобом для інтенсифікації естерифікаційних процесів, забезпечуючи підвищену ефективність реакцій, зниження енергетичних витрат та покращення якості кінцевого продукту. Використання кавітаційних технологій відкриває нові можливості для вдосконалення хімічних виробництв та підвищення їх конкурентоспроможності.

Ключові слова: *кавітація, кавітаційний реактор, естерифікація, інтенсифікація процесів, гідродинамічна кавітація, оптимізація хімічних реакцій, енергозбереження.*

Вступ. Сучасна хімічна та нафтохімічна промисловість зіштовхується з необхідністю підвищення ефективності виробничих процесів, зменшення енергетичних витрат та покращення екологічної безпеки. Одним із перспективних методів удосконалення хімічного синтезу є застосування фізичних і механічних впливів, зокрема кавітації. Завдяки своїй здатності інтенсифікувати реакції, підвищувати масообмін та сприяти економії енергії, кавітаційні технології знаходять широке застосування в різних галузях. Використання кавітаційних реакторів у процесі естерифікації дозволяє покращити кінетику реакцій,

збільшити вихід продукції та зробити виробничі процеси більш оптимізованими.

Кавітація являє собою явище формування, зростання та подальшого руйнування мікробульбашок у рідкому середовищі за дії змінного тиску. Під час колапсу бульбашок виникають високі температури, значні тиски та інтенсивна турбулентність, що сприяє руйнуванню міжмолекулярних зв'язків і прискоренню хімічних процесів. Використання цього ефекту дозволяє значно прискорити реакції естерифікації, покращити ефективність каталізаторів і скоротити витрати енергії.

Процес естерифікації відіграє важливу роль у створенні складних ефірів, які використовуються у виробництві біопалива, лікарських засобів, косметики та харчових добавок. Однак традиційні методи синтезу часто потребують значних енергетичних ресурсів, довготривалого процесу реакції та великої кількості каталізаторів, що збільшує виробничі витрати та створює екологічні проблеми. Впровадження кавітаційних технологій у процес естерифікації може стати ефективним рішенням, що сприятиме його удосконаленню, підвищенню ефективності та зниженню екологічного впливу.

Застосування кавітаційних реакторів у промислових процесах естерифікації має низку переваг, включаючи покращену селективність реакцій, зменшення побічних продуктів та підвищення енергоефективності. Водночас для ефективного впровадження цієї технології необхідні додаткові дослідження щодо оптимізації параметрів роботи реакторів, вивчення механізмів впливу кавітації на реакційну здатність речовин та оцінки її економічної доцільності у масштабному виробництві.

Недавні дослідження показали, що застосування явища кавітації, зокрема через гідродинамічні кавітаційні реактори (HCR), значно інтенсифікує процес етерифікації, підвищуючи ефективність виробництва біодизеля. *(Saharan VK (2016))* [1]

Гідродинамічна кавітація включає утворення, зростання та імплозивний колапс заповнених парою порожнин у рідині, що призводить до інтенсивного локального виділення енергії. Ця енергія, на думку *(Mingming Ge, Guangjian Zhang, Martin Petkovšek, Kunpeng Long, Olivier Coutier-Delgosha (2022))* сприяє покращенню змішування та масообміну між незмішуваними реагентами, такими як олії та спирти, тим самим прискорюючи реакцію етерифікації.[2]

У недавньому дослідженні *(Sun 孙逊, Xun & Xuan, Xiaoxu & Song, Yongxing & Jia, Xiaoqi & Ji, L& Zhao, Shan & Yoon, Joon-Yong & Chen, Songying & Liu, Jingting & Wang, Guichao. (2021))* використовували HCR, оснащені роторами та статорами, надрукованими на 3D, для зменшення вмісту вільних жирних кислот (ВЖК) у дистиляті пальмових жирних кислот. При роботі в оптимальних умовах – 9 мас.% метанолу, 133 хвилини циркуляції та швидкість ротора 2000 об/хв – процес досяг максимальної чистоти метилового ефіру 89,76 мас.% і виходу біодизеля 82,48 мас.%[3]

Інше дослідження використовувало ротор-статор HCR для посилення емульгування нерозчинних реагентів, таких як олія та спирт, що призвело до покращення ефективності етерифікації

Дослідження*, (Sarker TR, Pattnaik F, Nanda S, Dalai AK, Meda V, Naik S (2021))* що порівнюють методи на основі кавітації з традиційними підходами, підкреслили переваги кавітації в етерифікації. Наприклад, дослідження, зосереджене на етерифікації олії каранджа, показало, що акустична кавітація досягла значного зниження кислотного числа в умовах навколишнього середовища, перевершуючи звичайні методи як за ефективністю, так і за споживанням енергії. [4]

Інтеграція технології кавітації в промислове виробництво біодизеля показала багатообіцяючі результати. Реактор Shockwave Power Reactor (SPR) використовує контрольовану кавітацію для швидкої переетерифікації рослинних або тваринних жирів, досягаючи більш високого виходу та нижчого вмісту моногліцеридів порівняно зі звичайними реакторами.

Метою роботи є дослідження застосування явища кавітації, зокрема за допомогою гідродинамічних та акустичних кавітаційних реакторів, для інтенсифікації процесу етерифікації. Дослідження має на меті проаналізувати, як кавітація покращує масообмін, кінетику реакції та енергоефективність при етерифікації, що призводить до покращення швидкості конверсії та скорочення часу обробки.

Крім того, у статті оцінено потенціал кавітаційних реакторів у промисловому виробництві біодизеля, порівнюючи їх ефективність із традиційними методами.

Представляючи результати останніх досліджень і тематичні дослідження, стаття прагне висвітлити переваги, проблеми та майбутні перспективи впровадження технології кавітації в процеси етерифікації..

Виклад основного матеріалу. Феномен кавітації відбувається, коли в рідині утворюються мікропухирці пари, які зростають і потім руйнуються через різке зменшення локального тиску. Залежно від режимів утворення кавітація класифікується на три типи: акустична, гідродинамічна, оптична. Акустична кавітація отримується шляхом пропагування ультразвукового сигналу (20–100 кГц) великої амплітуди в рідині і є найбільш поширеним способом утворення кавітації на лабораторному рівні *(Hilares RT, Dionízio RM, Prado CA, Ahmed MA, da Silva SS, Santos JC (2019))*.[5]

Гідродинамічна кавітація є більш ефективною, ніж акустична кавітація в багатьох застосуваннях через свою здатність окислювати органічні речовини, поєднану з низькою вартістю операцій, легкістю масштабування, високою енергоефективністю та меншою забруднюваністю без утворення побічних продуктів *(Jensen MB, Kofoed MVW, Fischer K, Voigt NV, Agneessens LM, Batstone DJ, Ottosen LDM (2018))*. [6]

Кавітація утворюється через механічні обмеження, такі як труби Вентурі, пластини та клапани обмеження потоку. Кавітацію можна пояснити за допомогою співвідношення швидкості та тиску рідини згідно з рівнянням Бернуллі. Коли рідина протікає через звуження, тиск зменшується до значення, нижчого за тиск рідина–пара, з температурою потоку, і формуються пари, які руйнуються в нижньому потоці та створюють високодеструктивні ударні хвилі з великим тиском, сильною турбулентністю і генерують напругу *(Авдєєва, Леся & Макаренко, Андрій & Щенський, Дмитро. (2022))* [7]. Це руйнування достатньо сильне, щоб вивільнити великі кількості енергії на короткому просторі *(Khullar E, Dien BS, Rausch KD, Tumbleson ME, Singh V (2013))*.[8]

Імплозія пари може локально генерувати високі температури, що викликає фізичні та хімічні перетворення, виробляючи сильні окислювальні радикали, такі як гідроксильний радикал (OH-), через розпад молекул води та органічних молекул, що потрапляють у пари або поруч з ними, сприяючи структурній дезінтеграції та збільшенню пористості біомаси *(Badve MP, Alpar T, Pandit AB, Gogate PR, Csoka L (2015))*. [9]

Як зазначає *(Chuah L.F., Yusup S., AbdAziz A.R., Bokhari A., Jaromír K., MohdZamri A.(2015)):* кавітація – це фізичне явище, що виникає в рідинах при швидких змінах тиску, спричиняючи утворення і руйнування бульбашок пари. Цей процес супроводжується вивільненням великої кількості енергії, яка може сприяти перебігу хімічних реакцій, зокрема естерифікації. Використання кавітаційних реакторів дозволяє створити середовище з високою інтенсивністю мікрозмішування, що покращує швидкість реакції та підвищує вихід продуктів.[23]

Естерифікація – це хімічна реакція між кислотою та спиртом, у результаті якої утворюється складний ефір і вода. Зазвичай цей процес каталізується кислотами, такими як сірчана кислота, і відбувається за загальним рівнянням.

Застосування кавітації у процесі естерифікації сприяє підвищенню ефективності реакції завдяки кільком чинникам:

- Колапс бульбашок створює локалізовані зони з екстремально високими температурами (до 5000 К) і тиском (до 1000 атм), що прискорює кінетику реакції.
- Високоенергетичні умови сприяють утворенню активних радикалів, зокрема гідроксильних і алкоксирадикалів, які можуть каталізувати розпад реагентів.
- Покращується масообмін: інтенсивне мікроперемішування зменшує ефект граничного шару та збільшує швидкість реакції.
- Завдяки ефективному диспергуванню реагентів відбувається емульгування, що збільшує площу контакту між кислотою та спиртом, забезпечуючи вищий вихід ефіру.[24]

Кавітаційний реактор працює на основі використання високоенергетичних гідродинамічних процесів для генерації кавітації. У процесі естерифікації застосовують два основні типи таких реакторів:

Гідродинамічні кавітаційні реактори – створюють кавітацію за рахунок зміни тиску у вузьких каналах, наприклад, у трубках Вентурі або спеціальних отворах.

Ультразвукові кавітаційні реактори – використовують звукові хвилі високої частоти (20–40 кГц) для утворення кавітаційних бульбашок у рідині.

До ключових параметрів конструкції кавітаційного реактора, на думку *(Mellouk H., Meullemiestre A., Maache-Rezzoug Z., Bejjani B., Dani A., and Rezzoug S.A.(2016))*:

Число Рейнольдса (Re): визначає, чи є потік турбулентним (ідеально підходить для кавітації).

де – густина рідини, – швидкість, – гідравлічний діаметр і – в'язкість.

Число кавітації: вказує на ступінь кавітації. де - тиск на вході, - тиск пари, і - швидкість.

Нижчі значення сприяють більшій інтенсивності кавітації.[25]

Застосування кавітаційних реакторів сприяє значному прискоренню процесу естерифікації, оскільки покращує масообмін, емульгування та реакційну кінетику. Оптимізація умов кавітації дозволяє промисловості підвищити ефективність виробництва, знизити енергетичні витрати та забезпечити більш стійкий синтез складних ефірів.

Що стосується парових бульбашок, то існує два основні параметри: максимальний розмір бульбашки та її відстань подорожі до руйнування, тобто її корисний термін служби. Після утворення парових бульбашок починається процес розширення через швидке випаровування рідини. Якщо під час цього процесу бульбашки піддаються тиску, вищому за тиск пари, їх розвиток переривається, тиск усередині бульбашки зростає, і починається конденсація пари, що призводить до руйнування бульбашки. Оскільки специфічний об'єм пари більший за специфічний об'єм рідини, руйнування створює порожнечі, що спричиняють ударні хвилі. Максимальний розмір бульбашки визначає інтенсивність кавітації. Бульбашки ростуть за низького тиску або високої температури, і більші бульбашки вибухають з більшою інтенсивністю і можуть мати сильніший вплив на речовину, ніж менші бульбашки *(Xun Sun, Gaoju Xia, Weibin You, Xiaoqi Jia, Sivakumar Manickam, Yang Tao, Shan Zhao, Joon Yong Yoon, Xiaoxu Xuan (2023)).* [10]

Гідродинамічну кавітацію також можна створити обертальним механічним об'єктом, що рухається через рідину, як це відбувається в насосах відцентрових насосів і роторах гідравлічних турбін. Хоча це небажане явище в області гідравлічного обладнання, гідродинамічна кавітація застосовується в обробці води та стічних вод, виробництві біогазу, руйнуванні клітин, виробництві біодизелю, видобутку олії з мікроводоростей, хімічних реакторах та попередній обробці лігноцелюлозної біомаси *(Lamoot, L., Manescau, B., Chetehouna, K., & Gascoin, N. (2021))*.[15]

Гідродинамічні кавітаційні реактори поділяються на дві категорії: неротаційні реактори, такі як отворові пластини або трубки Вентурі, та ротаційні реактори, де кавітація генерується в області, яку охоплюють пропелери з високою швидкістю *(Polczmann G., O.Toth A., Beck, Hancsok J.(2016))*.[12]

Гідродинамічний кавітаційний реактор також можна класифікувати за способами його роботи: пульсуючий гідродинамічний кавітаційний реактор (реактор, що працює циклами); безперервний гідродинамічний кавітаційний реактор і гідродинамічний кавітаційний реактор з розтягненням *(Calıskan, Y.; Yatmaz, H.C.; Bektas, N.(2017))*.[13]

Неротаційні гідродинамічні кавітаційні реактори (НГКР). НГКР складаються з бака для подачі, насоса, який здійснює круговий рух через реактор (кавітаційну камеру), а також контрольних клапанів, датчиків тиску та температури. Трубка Вентурі складається з трьох послідовних частин: звуженої секції (форсунка), горловини і розширювальної секції (дифузор). Вона може мати круглі або багатокутні поперечні перерізи в залежності від застосування і історично використовувалась для вимірювання та контролю витрати потоку, а також останнім часом застосовується в системах очищення газів, інжекторах тверде–газові, гідравлічному насосі для струменевих систем та гідродинамічних кавітаційних реакторах *(Li, P.; Song, Y.; Wang, S.; Tao, Z.; Yu, S.; Liu, Y. (2015))*.[14]

Отворові пластини є простими, надійними, порівняно легкими та недорогими інструментами у порівнянні з трубками Вентурі. У реакторі з отворовими пластинами потік рідини проходить через одне або кілька звужень, при цьому відбувається різке збільшення швидкості, що призводить до падіння тиску нижче тиску рідина–пара, що спричиняє кавітацію. Коли потік рідини проходить через отвір, відбувається зміна форми потоку, що називається венозною контрактурою.

Згідно з дослідженням *(Lamoot, L., Manescau, B., Chetehouna, K., & Gascoin, N. (2021))*, трубки Вентурі перевершують отворові пластини в застосуваннях для дезінфекції, генеруючи більш щільну кавітацію та більше утворених парових бульбашок. Крім того, трубки Вентурі мають вищі витрати потоку, ніж отворові пластини при однаковій енергії на

вході, що призводить до більшої потужності обробки та енергетичної ефективності, незважаючи на вищу вартість виробництва. Крім того, в системах трубок Вентурі з високим навантаженням твердих часток може знадобитись використання спеціальних насосів, таких як діафрагмові та гвинтові насоси, з відносно вищими витратами порівняно зі звичайними відцентровими насосами.[15]

За даними *(Вашкурак У. Ю., Шевчук Л. І. (2016))*, тиск відновлюється плавно в трубках Вентурі завдяки кутаві дивергенції, залишаючи паравими порожнинами достатньо часу для зростання до максимального розміру, що збільшує інтенсивність колапсу та ефективність кавітації, чого не відбувається в отворових пластинах.[16]

Ротаційні гідродинамічні кавітаційні реактори (РГКР). Ротаційні реактори базуються на відцентрових насосах, які мають змінений ротор і додатковий статор у своїй оболонці. У цьому типі реактора явище кавітації генерується численними одиницями генерації кавітації (ОГК), розташованими на роторі та статорі. Геометрична структура ОГК є важливою для генерації кавітації, а також для ефективності та економічної ефективності. Крім того, частота вивільнення енергії значно вища порівняно з НГКР. Ротаційні реактори показали відмінну ефективність у порівнянні з неротаційними реакторами для делігніфікації, очищення води, виробництва біодизелю та дисоціації мулу *(Oo, Y.M., Juera-Ong, P. & Somnuk, K.(2024))*.[17]

Дослідження, що вивчають РГКР за допомогою експериментальної візуалізації потоку, обчислювальної гідродинаміки та характерного експерименту *(Haoxuan Zheng, Ying Zheng, Jesse Zhu (2022))* були представлені для розуміння механізмів та критеріїв проектування РГКР.[18]

Ротаційні реактори базуються на відцентрових насосах, які мають змінений ротор і додатковий статор у своїй оболонці. У цьому типі реактора явище кавітації генерується численними одиницями генерації кавітації (ОГК), розташованими на роторі та статорі. Геометрична структура ОГК є основною для генерації кавітації, а також для ефективності та економічної ефективності. Крім того, частота вивільнення енергії значно вища порівняно з НГКР. Ротаційні реактори показали відмінну ефективність у порівнянні з неротаційними реакторами для делігніфікації, очищення води, виробництва біодизелю та дисоціації мулу *(Samuel, O. D., Aigba, P. A., Tran, T. K., Fayaz, H., Pastore, C., Der, O., Erçetin, A., Enweremadu, C. C., & Mustafa, A. (2023))*.[19]

Дослідження, що вивчають РГКР за допомогою експериментальної візуалізації потоку, обчислювальної гідродинаміки та характерного експерименту були представлені для розуміння механізмів та критеріїв проектування РГКР.[21]

Вплив одиниць генерації кавітації (ОГК) на ефективність РГКР необхідно вивчати за допомогою обчислювальної гідродинаміки, оцінюючи вплив форми, діаметра, відстані взаємодії, висоти та кута нахилу ОГК на кількість генерованої кавітації та енергоспоживання представницького РГКР *(Hosseinzadeh Samani, B., Behruzian, M., Najafi, G., Fayazishishvan, E., Ghobadian, B., Behruzian, A., Mofijur, M., Mazlan, M., & Yue, J. (2021))*.[20]

Для подальшого поліпшення ефективності та розробки критеріїв проектування РГКР необхідна багатокритеріальна оптимізація в рамках РГКР. *(Mazubert A., Taylor C., Aubin J., ad Poux M., Key Role (2022))* вперше виконали багатокритеріальну оптимізацію, поєднуючи генетичний алгоритм (GA) і CFD. Вибраними цілями були мінімізація споживаної енергії та максимізація генерації гідродинамічної кавітації.[22]

Для оцінки теплової ефективності РГКР запропоновано два важливих параметри, згідно з Sun et al. (2020b): коефіцієнт генерації тепла (HGR) і теплову ефективність (TE). Коефіцієнт генерації тепла, який виробляється РГКР, визначається наступним чином:

Коефіцієнт генерації тепла (HGR) для роторно-гвинтового компресора-розширювача (РГКР) розраховується за формулою:

$$HGR = Q_{out} \times C_p \times \Delta T, \qquad (1)$$

де HGR — коефіцієнт генерації тепла, МДж/год; Q_{out} — витрата на виході, м³/год; C_p — питома теплоємність рідини, МДж/(м³·°C); ΔT — різниця температур між виходом і входом (Tout – Tin), °C.

Зверніть увагу, що питома теплоємність рідини (C_p) виражена в одиницях МДж/(м³·°C), що враховує густину рідини та її питому теплоємність.

Для обчислення густини рідини на виході (ρ_{out}) та теплової ефективності (TE) роторно-гвинтового компресора-розширювача (РГКР) застосовуються такі рівняння:

Оскільки густина рідини змінюється зі зміною температури, для води її можна визначити наближеною формулою:

$$\rho_{out} = 1000 - 0{,}0178 \times |T_{out} - 4| \qquad (2)$$

де ρ_{out} — густина рідини на виході, кг/м³; T_{out} — температура рідини на виході, °C.

Ця залежність враховує зміну густини води при різних температурах, де 1000 кг/м³ відповідає густині води за 4°C, а коефіцієнт 0.0178 описує зміну цього показника при відхиленнях від цієї температури.

Коефіцієнт теплової ефективності визначається як відношення виробленого тепла до енергоспоживання системи:

$$TE = HGR \div (3{,}6 \times P_s) \qquad (3)$$

де TE — теплова ефективність (безрозмірна величина); HGR — коефіцієнт генерації тепла, МДж/год; P_s — потужність на валу електродвигуна, кВт.

Множник 3.6 використовується для перетворення одиниць потужності з кВт у МДж/год (1 кВт = 3.6 МДж/год).

Індекс кавітації дає змогу оцінити ризик появи кавітаційних процесів у потоці рідини. Він визначається рівнянням:

$$\sigma_c = (P_{out} - P_v) \div (0{,}5 \times \rho_{out} \times V_{in}^2) \qquad (4)$$

де σ_c — індекс кавітації (безрозмірний); P_{out} — статичний тиск на виході, Па; P_v — тиск насиченого пару на виході, Па, ρout — густина рідини на виході, кг/м³, Vin — швидкість рідини на вході, м/с.

Цей параметр дозволяє оцінити, наскільки умови в системі сприяють виникненню кавітації, що важливо для збереження ефективності та довговічності обладнання.

Ефекти гідродинамічної кавітації можуть покращити передобробку лігноцеллюлозної біомаси та сприяти делігніфікації та подальшому гідролізу вуглеводів.

Перші дослідження щодо застосування гідродинамічної кавітації для передобробки лігноцеллюлозної біомаси відносяться до 2012 року і були проведені *(Baxi і Pandit (2012))*. У цьому дослідженні гідродинамічна кавітація використовувалася для делігніфікації деревини. Оскільки тирса обробляласягідродинамічна кавітація (трубчастий реактор Вентурі) і лужний розчин гідроксиду натрію (5% мас./мас.).

Делігніфікація, отримана за допомогою гідродинамічної кавітації, була приблизно на 4–5 порядків більшою, ніж отримані за допомогою акустичної кавітації (константи швидкості для делігніфікації були 9,78 × 10–6 та 6,8 × 10–1/хв. для акустичної та гідродинамічної кавітації відповідно).

Висновки. Застосування явищ кавітації, зокрема через гідродинамічні та акустичні кавітаційні реактори, виявилося ефективним методом інтенсифікації процесу етерифікації. Результати досліджень показують, що кавітація значно покращує масообмін, прискорює кінетику реакції та покращує загальну ефективність етерифікації, що робить її багатообіцяючою альтернативою звичайним методам.

Гідродинамічні кавітаційні реактори (HCR) продемонстрували свою здатність зменшувати вміст вільних жирних кислот у вихідній сировині, підвищувати вихід і чистоту складних ефірів і знижувати споживання енергії порівняно з традиційними підходами. Використання кавітації також сприяє кращому емульгування реагентів, забезпечуючи більш рівномірне реакційне середовище та вищі коефіцієнти конверсії.

Порівняльні дослідження підтверджують, що етерифікація за допомогою кавітації пропонує такі переваги, як скорочення часу обробки, менші вимоги до каталізатора та покращена якість продукту. Ці переваги роблять кавітаційні реактори придатними для промислового виробництва біодизеля, де ефективність і економічність є критичними факторами.

Незважаючи на переваги, такі проблеми, як оптимальна конструкція реактора, оптимізація енергоефективності та масштабованість, потребують подальшого дослідження, щоб максимізувати потенціал кавітаційної технології. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на вдосконаленні конфігурацій реакторів, дослідженні альтернативної сировини та інтеграції кавітаційних реакторів з іншими передовими методами обробки.

Підсумовуючи, впровадження технології кавітації в етерифікацію являє собою значний прогрес в інтенсифікації процесу, пропонуючи стійкий і ефективний підхід для виробництва біодизеля та інших промислових застосувань на основі етерифікації.

Література

1. Saharan VK Computational study of diferent venturi and orifce type hydrodynamic cavitating devices. J Hydrodyn 2016. 28(2):293–305. https:// doi.org/10.1016/s1001-6058(16)60631-5
2. Mingming Ge, Guangjian Zhang, Martin Petkovšek, Kunpeng Long, Olivier Coutier-Delgosha, Intensity and regimes changing of hydrodynamic cavitation considering temperature effects, Journal of Cleaner Production, Volume 338, 2022, 130470, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130470.
3. Sun 孙逊, Xun & Xuan, Xiaoxu & Song, Yongxing & Jia, Xiaoqi & Ji, L& Zhao, Shan & Yoon, Joon-Yong & Chen, Songying & Liu, Jingting & Wang, Guichao. Experimental and Numerical Studies on the Cavitation in an Advanced Rotational Hydrodynamic Cavitation Reactor for Water Treatment. Ultrasonics Sonochemistry. 2021. 70. 105311. 10.1016/j.ultsonch.2020.105311.
4. Sarker TR, Pattnaik F, Nanda S, Dalai AK, Meda V, Naik S Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: a review of steam explosion and subcritical water hydrolysis. Chemosphere 284:131372. 2021. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131372
5. Hilares RT, Dionízio RM, Prado CA, Ahmed MA, da Silva SS, Santos JC Pretreatment of sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation technology: semi-continuous and continuous process. Biores Technol 290:121777. 2019. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121777
6. Jensen MB, Kofoed MVW, Fischer K, Voigt NV, Agneessens LM, Batstone DJ, Ottosen LDM Venturi-type injection system as a potential H2 mass transfer technology for full-scale in situ biomethanation. Appl Energy 222:840–846. 2018. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.034
7. Авдєєва, Леся & Макаренко, Андрій & Щенський, Дмитро. (2022). Застосування ефектів гідродинамічної кавітації в харчовій промисловості. Scientific Works. 86. 44-50. 10.15673/swonaft.v86i1.2402.
8. Khullar E, Dien BS, Rausch KD, Tumbleson ME, Singh V Efect of particle size on enzymatic hydrolysis of pretreated Miscanthus. Ind Crops Prod 44:11–17. 2013. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.10.015
9. Badve MP, Alpar T, Pandit AB, Gogate PR, Csoka L Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. Ultrason Sonochem 22:272–277. 2015. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.017
10. Xun Sun, Gaoju Xia, Weibin You, Xiaoqi Jia, Sivakumar Manickam, Yang Tao, Shan Zhao, Joon Yong Yoon, Xiaoxu Xuan, Effect of the arrangement of cavitation generation unit on the performance of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 99 2023, 106544, ISSN 1350-4177, https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106544.
11. Bimestre TA, Júnior JAM, Botura CA, Canettieri E, Tuna CE Theoretical modeling and experimental validation of hydrodynamic cavitation reactor with a Venturi tube for sugarcane bagasse pretreatment. Biores Technol 311:123540. 2020. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123540
12. Polczmann G., O.Toth A., Beck, Hancsok J., Investigation of Storage Stability of Diesel Fuels Containing Biodiesel Produced from Waste Cooking Oil, J. Clean. Prod., 111. 2016.
13. Calıskan, Y.; Yatmaz, H.C.; Bektas, N. Photocatalytic oxidation of high concentrated dye solutions enhanced by hydrodynamic cavitation in a pilot reactor. *Process Saf. Environ. Prot.* 2017, *111*, 428–438.
14. Li, P.; Song, Y.; Wang, S.; Tao, Z.; Yu, S.; Liu, Y. Enhanced decolorization of methyl orange using zero-valent copper nanoparticles under assistance of hydrodynamic cavitation. *Ultrason. Sonochem.* 2015, *22*, 132–138.
15. Lamoot, L., Manescau, B., Chetehouna, K., & Gascoin, N. Review on the Effect of the Phenomenon of Cavitation in Combustion Efficiency and the Role of Biofuels as a Solution against Cavitation. *Energies*, 2021. *14*(21), 7265. https://doi.org/10.3390/en14217265
16. Вашкурак У. Ю., Шевчук Л. І. Кавітаційне очищення стічних вод жиркомбінату від органічних забруднень у присутності газів різної природи. Chemistry, Technology and Application of Substances = Хімія, технологія речовин та їх застосування. 2018. Vol. 1, № 1. P. 105–110. (фахове видання, Index Copernicus).
17. Oo, Y.M., Juera-Ong, P. & Somnuk, K. Methyl ester production process from palm fatty acid distillate using hydrodynamic cavitation reactors in series with solid acid catalyst. *Sci Rep* 14, 27732 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-78974-3
18. Haoxuan Zheng, Ying Zheng, Jesse Zhu. Recent Developments in Hydrodynamic Cavitation Reactors: Cavitation Mechanism, Reactor Design,

and Applications. *Engineering*, 2022, 19(12): 180–198 https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.027

19. Samuel, O. D., Aigba, P. A., Tran, T. K., Fayaz, H., Pastore, C., Der, O., Erçetin, A., Enweremadu, C. C., & Mustafa, A. Comparison of the Techno-Economic and Environmental Assessment of Hydrodynamic Cavitation and Mechanical Stirring Reactors for the Production of Sustainable *Hevea brasiliensis* Ethyl Ester. *Sustainability*, 2023. *15*(23), 16287. https://doi.org/10.3390/su152316287
20. Hosseinzadeh Samani, B., Behruzian, M., Najafi, G., Fayazishishvan, E., Ghobadian, B., Behruzian, A., Mofijur, M., Mazlan, M., & Yue, J. The rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor approach for enhanced biodiesel fuel production. Fuel, 2021. 283, Article 118821. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118821
21. Ющенко С.Л., Столяренко Г.С., Мислюк Є.В. Застосування явища кавітації і кавітаційного апарату для інтенсифікації процесів хімічної технології // Збірник матеріалів конференції IV Української науково-технічної конференції з технології неорганічних речовин, 14-16 жовтня 2008 р., Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2008.
22. Mazubert A., Taylor C., Aubin J., ad Poux M., Key Role of Temperature Monitoring in Interpretation of Microwave Effect on Transesterification and Esterification Reactions for Biodiesel Production, BioresourseTechnolgy, 16.1 2014.
23. Chuah L.F., Yusup S., AbdAziz A.R., Bokhari A., Jaromír K., MohdZamri A., Intensification of Biodiesel Synthesis from Waste Cooking Oil (Palm Olein) in a Hydrodynamic Cavitation Reactor: Effect of Operating Parameters on Methyl Ester Conversion, Chemical Engineering and Processing, 2015. 95: 235-240.
24. Ющенко С.Л., Столяренко Г.С., Мислюк Є.В. Отримання альтернативного палива (біодизелю) шляхом кавітаційного явища / Збірник тез доповідей II Всеукраїнської науково – практичної конференції з хімії та хімічної технології студентів, аспірантів та молодих вчених. К.: 2007. 247 с.
25. Mellouk H., Meullemiestre A., Maache-Rezzoug Z., Bejjani B., Dani A., and Rezzoug S.A.,Valorization of Industrial Wastes from French Maritime Pine Bark by Solvent free Microwave Extraction of Volatiles. J. Clean. Prod., 2016. 112 (Part 5), 4398-4405

Reference

1. Saharan VK Computational study of diferent venturi and orifce type hydrodynamic cavitating devices. *J Hydrodyn* 28(2):293–305. 2016. https:// doi.org/10.1016/s1001-6058(16)60631-5[in English]
2. Mingming Ge, Guangjian Zhang, Martin Petkovšek, Kunpeng Long, Olivier Coutier-Delgosha, Intensity and regimes changing of hydrodynamic cavitation considering temperature effects, *Journal of Cleaner Production*, 2022. Volume 338, 2022, 130470, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130470. [in English]
3. Sun 孙逊, Xun & Xuan, Xiaoxu & Song, Yongxing & Jia, Xiaoqi & Ji, L& Zhao, Shan & Yoon, Joon-Yong & Chen, Songying & Liu, Jingting & Wang, Guichao. Experimental and Numerical Studies on the Cavitation in an Advanced Rotational Hydrodynamic Cavitation Reactor for Water Treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*. 70. 105311. 2021. 10.1016/j.ultsonch.2020.105311. [in English]
4. Sarker TR, Pattnaik F, Nanda S, Dalai AK, Meda V, Naik S Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: a review of steam explosion and subcritical water hydrolysis. *Chemosphere* 284:131372. 2021. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131372 [in English]
5. Hilares RT, Dionízio RM, Prado CA, Ahmed MA, da Silva SS, Santos JC Pretreatment of sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation technology: semi-continuous and continuous process. *Biores Technol* 290:121777. 2019. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121777[in English]
6. Jensen MB, Kofoed MVW, Fischer K, Voigt NV, Agneessens LM, Batstone DJ, Ottosen LDM Venturi-type injection system as a potential H2 mass transfer technology for full-scale in situ biomethanation. *Appl Energy* 222:840–846. 2018. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.034[in English]
7. Avdeeva, Lesya & Makarenko, Andriy & Shchensky, Dmytro. Zastosuvannya efektiv hidrodynamichnoyi kavitatsiyi v kharchoviy promyslovosti. [Application of hydrodynamic cavitation effects in the food industry]. *Scientific Works*. 2022. 86. 44-50. 10.15673/swonaft.v86i1.2402. [in Ukrainian]
8. Khullar E, Dien BS, Rausch KD, Tumbleson ME, Singh V Efect of particle size on enzymatic hydrolysis of pretreated Miscanthus. *Ind Crops Prod* 44:11–17. 2013. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.10.015[in English]
9. Badve MP, Alpar T, Pandit AB, Gogate PR, Csoka L Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. *Ultrason Sonochem* 22:272–277. 2015. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch. 2014.05.017[in English]
10. Xun Sun, Gaoju Xia, Weibin You, Xiaoqi Jia, Sivakumar Manickam, Yang Tao, Shan Zhao,

Joon Yong Yoon, Xiaoxu Xuan, Effect of the arrangement of cavitation generation unit on the performance of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor, *Ultrasonics Sonochemistry,* Volume 99 2023, 106544, ISSN 1350-4177, https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106544. [in English]

11. Bimestre TA, Júnior JAM, Botura CA, Canettieri E, Tuna CE Theoretical modeling and experimental validation of hydrodynamic cavitation reactor with a Venturi tube for sugarcane bagasse pretreatment. *Biores Technol* 311:123540. 2020. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123540[in English]
12. Polczmann G., O.Toth A., Beck, Hancsok J., Investigation of Storage Stability of Diesel Fuels Containing Biodiesel Produced from Waste Cooking Oil, J. *Clean. Prod.,* 111. 2016. [in English]
13. Calıskan, Y.; Yatmaz, H.C.; Bektas, N. Photocatalytic oxidation of high concentrated dye solutions enhanced by hydrodynamic cavitation in a pilot reactor. *Process Saf. Environ. Prot*. 2017, 111, 428–438. [in English]
14. Li, P.; Song, Y.; Wang, S.; Tao, Z.; Yu, S.; Liu, Y. Enhanced decolorization of methyl orange using zero-valent copper nanoparticles under assistance of hydrodynamic cavitation. *Ultrason. Sonochem*. 2015, 22, 132–138. [in English]
15. Lamoot, L., Manescau, B., Chetehouna, K., & Gascoin, N. Review on the Effect of the Phenomenon of Cavitation in Combustion Efficiency and the Role of Biofuels as a Solution against Cavitation. *Energies,* 2021. 14(21), 7265. https://doi.org/10.3390/en14217265[in English]
16. Vashkurak U. Yu., Shevchuk L. I. Kavitatsiyne ochyshchennya stichnykh vod zhyrovoho kombinatu vid orhanichnykh zabrudnen′ u prysutnosti haziv riznoyi pryrody. [Cavitation treatment of wastewater from a fat factory from organic contaminants in the presence of gases of various nature].*Chemistry, Technology and Application of Substances Khimiya, tekhnolohiya rechovyn ta yikh zastosuvannya.* 2018. Vol. 1, №1. P. 105–110. [in Ukrainian]
17. Oo, Y.M., Juera-Ong, P. & Somnuk, K. Methyl ester production process from palm fatty acid distillate using hydrodynamic cavitation reactors in series with solid acid catalyst. *Sci Rep* 14, 27732. 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-78974-3[in English]
18. Haoxuan Zheng, Ying Zheng, Jesse Zhu. Recent Developments in Hydrodynamic Cavitation Reactors: Cavitation Mechanism, Reactor Design, and Applications. *Engineering*, 2022. 19(12): 180–198 https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.027[in English]
19. Samuel, O. D., Aigba, P. A., Tran, T. K., Fayaz, H., Pastore, C., Der, O., Erçetin, A., Enweremadu, C. C., & Mustafa, A. Comparison of the Techno-Economic and Environmental Assessment of Hydrodynamic Cavitation and Mechanical Stirring Reactors for the Production of Sustainable Hevea brasiliensis *Ethyl Ester. Sustainability*, 2023. 15(23), 16287. https://doi.org/10.3390/su152316287[in English]
20. Hosseinzadeh Samani, B., Behruzian, M., Najafi, G., Fayazishishvan, E., Ghobadian, B., Behruzian, A., Mofijur, M., Mazlan, M., & Yue, J. The rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor approach for enhanced biodiesel fuel production. Fuel, 2021. 283, Article 118821. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118821[in English]
21. Yushchenko S.L., Stolyarenko G.S., Myslyuk E.V. Zastosuvannya yavyshcha kavitatsiyi i kavitatsiynoho aparatu dlya intensyfikatsiyi protsesiv khimichnoyi tekhnolohiyi [Application of the phenomenon of cavitation and cavitation apparatus for intensification of chemical technology processes] *Collection of materials of the IV Ukrainian scientific and technical conference on the technology of inorganic substances,* October 14-16, 2008, – Dneprodzerzhinsk: DSTU, 2008. [in Ukrainian]
22. Mazubert A., Taylor C., Aubin J., ad Poux M., Key Role of Temperature Monitoring in Interpretation of Microwave Effect on Transesterification and Esterification *Reactions for Biodiesel Production, BioresourseTechnolgy*, 2014. 161. [in English]
23. Chuah L.F., Yusup S., AbdAziz A.R., Bokhari A., Jaromír K., MohdZamri A., Intensification of Biodiesel Synthesis from Waste Cooking Oil (Palm Olein) in a Hydrodynamic Cavitation Reactor: Effect of Operating Parameters on Methyl Ester Conversion, *Chemical Engineering and Processing,* 2015. 95: 235-240. [in English]
24. Yushchenko S.L., Stolyarenko G.S., Myslyuk E.V. Otrymannya al′ternatyvnoho palyva (biodyzelyu) shlyakhom kavitatsiynoho yavyshcha [Obtaining alternative fuel (biodiesel) by means of the cavitation phenomenon] / *Collection of abstracts of the II All-Ukrainian Scientific and Practical Conference on Chemistry and Chemical Technology of Students, Postgraduate Students and Young Scientists*. K.: 2007. 247p.[in Ukrainian]
25. Mellouk H., Meullemiestre A., Maache-Rezzoug Z., Bejjani B., Dani A., and Rezzoug S.A., Valorization of Industrial Wastes from French Maritime Pine Bark by Solvent free Microwave Extraction of Volatiles. *J. Clean. Prod*., 112 (Part 5), 2016. 4398-4405. [in English]

Andreiev M. S., Stolyarenko G. S. Application of cavitation phenomenon and cavitation reactor for intensification of the esterification process

The article explores the use of cavitation phenomena to enhance the esterification process, which plays a crucial role in the chemical and petrochemical industries. The mechanisms of cavitation bubble formation, their influence on the physicochemical properties of the medium, and the acceleration of reactions in liquid-phase systems are examined. The advantages of a cavitation reactor for improving technological processes, increasing productivity, and reducing energy consumption are demonstrated.

Esterification is a widely used method for synthesizing complex esters, which are applied in organic synthesis, biofuel production, and the food, cosmetics, and pharmaceutical industries. Traditional esterification methods require significant energy expenditures and catalysts to achieve effective reaction performance. The study proves that cavitation effects contribute to more intensive mixing of reactants, the breakdown of intermolecular bonds, increased catalytic efficiency, and reduced process duration.

Various types of cavitation reactors, including hydrodynamic, ultrasonic, and acoustic systems, and their impact on esterification efficiency are analyzed. The results of experimental studies confirm that cavitation application ensures reaction product stability, minimizes the formation of by-products, and increases the yield of the final ester. Optimal operating parameters for the cavitation reactor, such as pressure, ultrasonic wave frequency, temperature, and reactant feed rate, are determined.

Additionally, the article provides an economic analysis of implementing cavitation technologies in industrial processes. It is established that the use of cavitation effects significantly reduces energy consumption, lowers catalyst costs, and improves the environmental performance of production. The prospects for further development of this technology are discussed, including the potential integration of cavitation reactors into existing production lines and their application in related industrial sectors.

Thus, the study results confirm that cavitation is a powerful tool for intensifying esterification processes, ensuring increased reaction efficiency, reduced energy costs, and improved product quality. The application of cavitation technologies opens new opportunities for optimizing chemical production and enhancing its competitiveness.

Keywords: *cavitation, cavitation reactor, esterification, process intensification, hydrodynamic cavitation, chemical reaction optimization, energy saving.*

Андреєв Максим Сергійович – аспірант Черкаський державний технологічний університет м. Черкаси, Україна andreiew.maksym@gmail.com
Столяренко Генадій Степанович – доктор технічних наук, професор Черкаський державний технологічний університет м. Черкаси, Україна radikal@ukr.net

Стаття подана 15.01.2025.

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-67-76

УДК 678.746.32.5

СПОСОБИ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ

Савчук Б.П., Пушкарьов Д.В.

METHODS OF POLYMER WASTE PROCESSING

Savchuk B.P., Pushkarov D.V.

Проведено аналіз існуючих способів утилізації пластикових відходів, таких як захоронення, спалювання, механічна та хімічна переробка. Показано переваги та недоліки існуючих способів утилізації та переробки пластмасових відходів в різних частинах світу. Так, захоронення та спалювання є найпоширенішими та найдешевшими способами утилізації полімерних відходів. Захоронення призводить лише до накопичення відходів на сміттєзвалищах, а спалювання полімерних відходів дозволяє регенерувати значну кількість енергії, що може бути використана в різних галузях. Проте спалювання генерує надмірне виділення парникового газу в атмосферу, що негативно впливає на навколишнє середовище. Механічна та хімічна переробка полімерних відходів дозволяє знижувати обсяги відходів та повторно використовувати матеріали. Проте при обробці пластиків важливою є проблема сортування відходів, що ускладнює переробку пластикових сумішей та знижує ефективність використання цих технологій.

Проведено пошук нових підходів в процесах утилізації та переробки полімерних відходів, що дозволять реалізувати принципи циклічного використання матеріалів.

Розглянуто особливості процесів переробки різних типів полімерних матеріалів методами механічної та хімічної переробки з попереднім сортуванням за типами. Встановлено можливості повторного застосування отриманих продуктів перероблення полімерних матеріалів. Проаналізовано можливість застосування біополімерів для вирішення проблеми утилізації полімерних відходів. Розглянуто можливість застосування принципів циклічної економіки до організації переробки відходів біополімерів. Показано можливість ефективного поєднання комплексних рішень в напрямку управління полімерними відходами при реалізації засад бережного виробництва.

Запропоновано комплексний підхід до переробки полімерних відходів синтетичних та біополімерів шляхом їх перетворення у продукти придатні для повторного використання з використанням сучасним методів та підходів, цифрових технологій та нових концепцій. Застосування елементів діджиталізації при організації переробки полімерних відходів дозволить перенести ці технології на наступний щабель розвитку для забезпечення сталого розвитку та покращення екологічної ситуації.

Ключові слова: *полімерні відходи, циклічна економіка, технології переробки, синтетичні полімери, біорозкладані полімери.*

Вступ. Людська діяльність завдає значного впливу стану навколишньому середовищу. Швидке зростання промисловості, урбанізація та споживання ресурсів призвели до скорочення природних ресурсів, забруднення повітря, води і ґрунтів, а також до змін клімату. Вирубка лісів, розширення сільськогосподарських угідь і будівництво інфраструктури руйнують природні екосистеми та знижують біорізноманіття.

Промислові відходи і хімічні забруднювачі забруднюють річки, озера і океани, що призводить до загибелі морських екосистем і загрожує здоров'ю людей. Викиди парникових газів, вуглекислого газу та метану спричинені спалюванням викопного палива, стали головним фактором глобального потепління та зміни клімату.

Ці негативні наслідки змушують нас переглянути наші підходи до використання ресурсів та управління відходами. У відповідь на ці виклики важливо впроваджувати

екологічно чисті технології та стратегії сталого розвитку. Багато вчених ототожнюють зміну клімату з коливаннями природних процесів під впливом техногенної діяльності людини, викликаної розвитком промисловості та сільського господарства, а стрімке збільшення населення та відходів лише погіршує становище [1-2]. Наслідками такої діяльності є втрата біорізноманіття, що може призвести до розпаду екологічних груп та серйозних змін в екосистемах [3-5].

Значну частину твердих відходів складає пластик. У Європі та Північній Америці щорічно утворюється від 1,6 до 2,2 тон твердих відходів на людину, які можна поступово переробити або повторно використовувати [6-8]. За офіційними оцінками, у 2015 році в Сполучених Штатах утворилося приблизно 238 мільйонів тон побутових відходів. [9]. Середньодобова кількість твердих побутових відходів у Китаї становить 7,3 тис т. [10-14].

Метою роботи є аналіз існуючих способів утилізації пластикових відходів та пошук нових підходів до реалізації принципів циклічної економіки в процесах переробки полімерних відходів.

Результати дослідження. Дякуючи значному спектру застосування полімери стали невід'ємною складовою сучасного життя (Рис. 1, б) [15]. Середній річний обсяг виробництва полімерних матеріалів в період з 2016 по 2020 роки перевищує 330 мільйонів метричних тон (рис.1, а). За оцінками, до 2050 року світове виробництво пластику становитиме близько 1,1 мільярда тон (рис. 1, а) [16].

За інформацією агентство охорони навколишнього середовища, що з усієї кількості пластикових відходів, які утворюються, тільки 9% щорічно переробляється (рис. 2, б).

Дослідження показали, що 19% пластику спалюється, а решта відправляється на смітник для захоронення або взагалі не утилізується. Висока енергоємність і вартість процесу захоронення призводять до того, що цей процес не завжди відповідає технології, внаслідок чого відходи потрапляють у водойми [17, 18]. Пластикові відходи важко розкладаються і можуть спричинити забруднення навколишнього середовища [19]. Тому правильне поводження з пластиковими відходами є основним фактором вирішення проблем із забруднення навколишнього середовища та сталого розвитку. Тому так важливо перейти від традиційної моделі менеджменту відходів до генеративної та відновлювальної моделі.

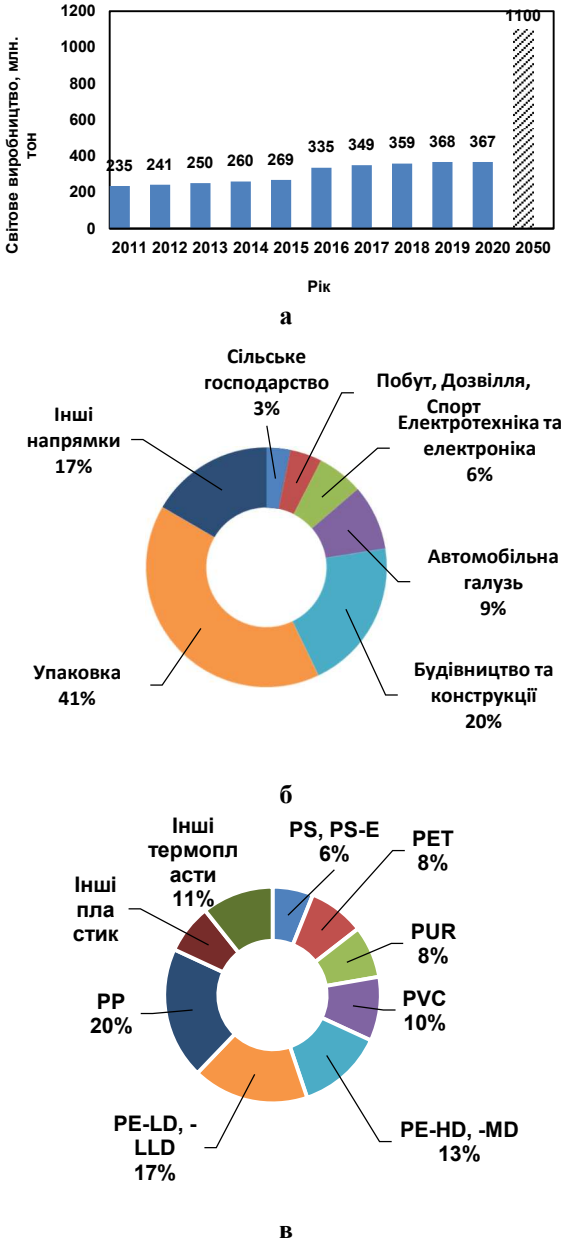


Рис. 1. Світове виробництво полімерів [21]: а – об'єми виробництва пластику за період з 2011-2020 та оцінка на 2050 рік, б – розподіл пластику за сферами використання, в – розподіл використання пластику за типами полімерів

Генеративна модель менеджменту спрямована на створення систем, які відновлюють та покращують природні ресурси, замість того щоб просто знижувати шкоду. Вона включає в себе підходи до переробки, повторного використання та утилізації відходів, які мінімізують негативний вплив на довкілля та сприяють сталому розвитку.

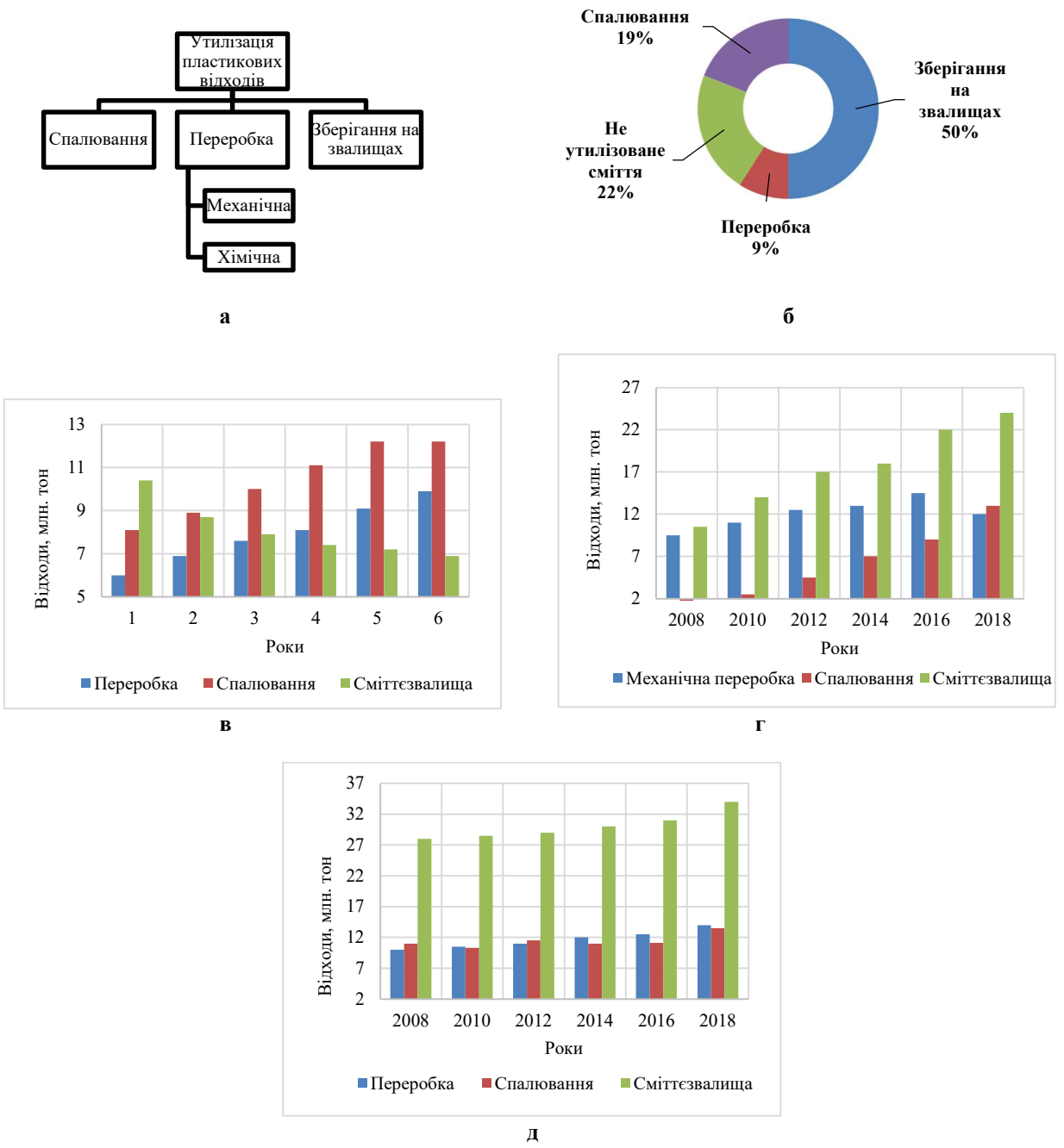


Рис. 2. Глобальна утилізація пластикових відходів [23-28]:
а – способи утилізації пластикових відходів, б – світовий розподіл способів утилізації пластикових відходів, в – тренди утилізації пластикових відходів у Євросоюзі за 2010-2020 роки, г – тренди утилізації пластикових відходів у Китаї за 2008-2017 роки, д – тренди утилізації пластикових відходів у США за 2008-2018 роки

Відновлювальна модель менеджменту акцентує увагу на циклічній економіці, де матеріали і ресурси використовуються повторно, зберігаючи їхню цінність протягом тривалого часу. Це означає перехід від лінійної економіки до циклічної, де продукти розробляються з урахуванням їхньої подальшої переробки та відновлення.

Перехід до цих нових моделей допоможе зменшити навантаження на природні ресурси, скоротити кількість відходів, що потрапляють на звалища. Це є критично важливим кроком для забезпечення екологічної стійкості та збереження нашої планети для майбутніх поколінь.

До стандартних методів переробки та утилізації пластикових матеріалів відносять термічне розкладання або спалювання, захоронення на звалищах, механічну та хімічну переробку (рис. 2, а). Основною проблемою, яка

залишається в переробці полімерних відходів, є їх швидка, ефективна ідентифікація та сортування [20].

Більшість полімерних відходів викидають на сміттєзвалища та у навколишнє середовище (рис. 2, б). Тим часом енергетична переробка пластикових відходів зазвичай використовується шляхом спалювання, в якому значна кількість енергії може бути регенерована та використана в різних галузях [22]. Проте такий спосіб має свої недоліки (рис. 2, а) надмірне виділення парникового газу в атмосферу під час спалювання.

Полімерні матеріали значно менше переробляються порівняно з іншими матеріалами, які споживаються у великих кількостях, такими як скло, папір, кераміка та алюміній [29, 30]. Загальна переробка пластику складна технологія через його багатоступеневу обробку, утилізацію та сортування, розповсюдження та використання [31, 32].

Для цілей вторинної переробки полімери повинні мати маркування такі як: PET – поліетилетерефталат - 1 , HDPE – поліетилен високої щільності – 2, PVC – полівінілхлорид - 3, LDPE – поліетилен низької щільності - 4, PP – поліпропілен - 5, PS – полістирол – 6 і Other - інші полімери - 7. Згідно з дослідженнями, здатність до сортування та переробки пластикових матеріалів, згаданих у цій категорії, становить понад 50%.

Пластикові відходи можна переробляти хімічним та механічним шляхом (рис. 2, а, рис. 3). Початковим етапом їх сортують, що, за допомогою різних технологій, таких як густина, колір, електростатичні властивості, інфрачервоне випромінювання. Механічна переробка є найбільш використовуваною технікою переробки полімерів завдяки швидкому процесу та ефективності (рис. 3). Однак, в деяких джерелах, механічна переробка описується як не ефективна через складність переробки сумішей відходів, тому більшість пластикових відходів спалюється [33-35]. Під час хімічної переробки полімерний ланцюг розривається до вихідних мономерів, які можна використовувати разом з первинною сировиною. (рис. 3).

Продукти отримані матеріали в результаті переробки полімерних відходів можуть бути більш екологічними та ефективними, щоб замінити інші типи матеріалів. Наприклад, перероблені відходи поліетиленових пакетів, були використані для виробництва підлогової плитки з покращеними механічними властивостями та меншою горючістю [36]. Це дослідження показало, що поліетиленові пакети, які, як відомо, є основним джерелом забруднення води та ґрунту, можна перетворити на дуже міцні та легкі, а головне корисні вироби. Пластикові відходи також використовують у виробництві балок, армованих волокном [37, 38], тротуару [39], для виробництва цементу [40], для модифікації асфальтового покриття [41]. Пластикові відходи можуть бути використані як потенційна заміна деревини, блоків і цегли за допомогою обробки формовкою [42].

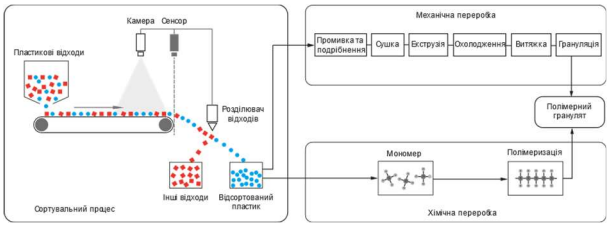


Рис. 3. Схеми переробки полімерних відходів механічним та хімічним методами

Відомо що існують певні обмеження у переробці та використанні пластикових відходів, на які варто звернути увагу. Головне обмеження переробки пластикових відходів це складнощі збору відходів та налагодженої інфраструктури. Не повне розуміння довгострокової ефективності переробленого пластику призвело до обмеження прийому та використання пластикових відходів підрядниками. Пластикові відходи часто складаються з різних типів пластику з різноманітними технологічними та експлуатаційними добавками, отже, їх переробка без належного сортування може призвести до неоднорідних характеристик отриманого композиційного матеріалу. Переробка певних типів полімерів потребує спеціального обладнання, що часто перешкоджає переробці цих типів пластикових відходів в країнах з несприятливою економічною ситуацією. Також, не менш важливим фактором, що перешкоджає якісній переробці полімерних відходів, є відсутність стандартів переробки. Наприклад, незважаючи на широкі дослідження використання пластикових відходів у цементних композитах, досі немає стандарту для використання пластикових відходів у будівельних цілях.

Ще однією концепцією у боротьбі з полімерними відходам деякі фахівці вважають використання біорозкладаних пластиків.

Біорозкладаний пластик який часто сприймається як можливе вирішення проблеми полімерних відходів придатний до розкладу лише за певних умов, котрі часто не є здійсненими у природньому середовищі. Тобто ефективність біорозкладу можливо забезпечити лише за наявності розвиненої системи промислового компостування, що є значним викликом для країн що розвиваються.

Біонічний розклад таких пластиків відбувається при певних умовах, пов'язаних із середовищем утилізації та часом розкладання. Біодеградабельність слід розглядати як кращий спосіб утилізації одноразових виробів після того, як він виконав свою роль, наприклад, для упаковки харчових продуктів, сільськогосподарських або медичних виробів. Біорозклад - своєчасний, безпечний та ефективний спосіб повного розкладання пластикових виробів, призначених для біологічного розкладання, у середовищі утилізації через харчовий ланцюг мікроорганізмів. Біологічне розкладання може відбуватись в умовах компостування (компостований пластик), ґрунтових умовах, анаеробних умовах (анаеробні метантенки, полігони) або морських умовах [43].

Біорозклад пластиків складається з двох етапів: фрагментації, тобто руйнування полімерних ланцюгів під впливом тепла, під впливом комплексу чинників, що призводить до фрагментації пластикового матеріалу, та асиміляції фрагментів пластику мікробним середовищем. Для того, щоб пластиковий виріб вважався біорозкладним, необхідна повна біодеградація (як фрагментація, так і асиміляція). Фрагменти пластику можуть становити потенційну небезпеку для навколишнього середовища, якщо вони не будуть повністю асимільовані мікробними популяціями, присутніми в системі утилізації, за відносно короткий період часу [43].

Біодеградабельність пластику залежить від багатьох факторів: сировини, хімічного складу, а також від умов навколишнього середовища, за яких відбувається біорозклад пластикових виробів. Якщо розкладаний пластик не розроблений спеціально для розкладання в певному середовищі, наприклад, у морському середовищі або ґрунті, він може не розкладатиметься в певних умовах. Біорозкладані пластмаси в основному призначені для біологічного розкладання в умовах промислових компостних установках, де температура перевищує 50°C впродовж тривалих періодів тижнів або місяців. Вони не повинні потрапляти в навколишнє середовище і не повинні розглядатися як вирішення проблеми засмічення навколишнього середовища пластиковими відходами. Основним рішенням для зменшення кількості пластику в навколишньому середовищі є краще управління відходами, особливо в країнах, що розвиваються.

Біорозкладані пластики можна розділити на дві групи: полімери природнього походження – ті що виготовляються з біомаси і мають вроджені властивість біологічного розкладання; та полімери з синтетичних ресурсів – ті які маю додаткову властивість, але виробляються з викопних ресурсів.

Ця група полімерів в основному використовується в поєднанні з полімерами пластиками на біологічній основі, наприклад, крохмалем або целюлозою. Їх здатність до біологічного розкладання та механічні властивості покращують експлуатаційні характеристики згаданих матеріалів у конкретних сферах застосування. Найважливішими біорозкладаними пластмасами на біологічній основі є полімери на основі крохмалю - термопластичний крохмаль, полімолочна кислота , полімери полігідроксикислоти, полімери целюлози. Основними допоміжними компонентами полімерних матеріалів є доданки, такі як наповнювачі пігменти, змащувальні агенти, стабілізатори та багато інших. Доданки покращують переробку цих матеріалів або кінцеві властивості продукту, наприклад, механічні. Для біорозкладних полімерів дуже важливо, щоб усі додаткові компоненти також піддавалися біологічному розкладанню, або були інертними, та не повині мати негативного впливу компостування [44].

Синтетичні полімери здебільшого отримують з нафтової сировини, з вугілля та природного газу. Це полімери, які не зустрічаються в природі, і, як наслідок, коли вони потрапляють у природне біотичне середовище, вони не можуть бути задіяніяні у процесс метаболізму живих організмів. Для таких цих полімерів здатність до розкладання може бути досягнута за рахунок інтеграції в полімер нестійких зв'язків (ефірних або складноефірних), які є чутливими до гідролітичної дії [45]. Такі полімерні матеріали представляють невелику групу розкладних полімерів на основі синтетичної сировини, які використовуються для покращення

властивостей розкладних пластиків на біологічній основі. Найважливішими з них є полібутиратадипаттерефталат, полібутиленсукцинат, полікапролактон та полівініловий спирт.

Розкладні полімери знайшли застосування в багатьох сферах застосування з коротким терміном служби, де здатність до розкладу є ключовою перевагою, наприклад, у пакуванні, харчовій промисловості, сільському господарстві. Для виробництва таких продуктів використовують розкладні пластмаси на біологічній основі та на основі синтетичної сировини та їх суміші. Проте розкладні пластики повноцінно не можуть замінити традиційні широковживані пластики у всіх сферах людської діяльності, оскільки не володіють таким широким спектром експлуатаційних властивостей. Перевагою розкладних пластиків над іншими видами пластику є їхня здатність до біологічного розкладання після завершення їх терміну експлуатації. Але ця додаткова властивість має цінність лише за умови правильного поводження з такими матеріалами, тобто якщо вони утилізуються за таких умов, які уможливлюють їх біологічне розкладання. Вони мають потенціал до розкладання природніми агентами лише за певних умов, але ці умови мають бути використані, щоб повністю скористатися перевагами розкладання полімерного матеріалу [46].

Підсумовуючи вище наведену інформацію можна сказати, що одним із дієвих способів комплексного вирішення таких екологічних проблем, як утилізація та переробка полімерних відходів може стати використання стратегії циклічної економіки на заміну традиційній лінійній (рис. 4).

Отже, використання технологій переробки та повторного використання відходів частково вирішує не тільки проблему дефіциту ресурсів, але й вносить важливий внесок у збереження екології. Завдяки таким технологіям зменшується необхідність у видобуванні нових природних ресурсів, що дозволяє зберегти природні екосистеми і зменшити екологічний вплив видобувної промисловості. Наприклад, використання вторинних матеріалів у виробництві зменшує потребу в видобуванні нових руд, що, в свою чергу, знижує викиди парникових газів та інші забруднювачі, пов'язані з цими процесами.

Рис. 4. Схематичне зображення лінійної та циклічної економіки

Цей підхід також сприяє формуванню циклічної економіки, яка порівняно з традиційною лінійною моделлю економіки, призводить до значних соціальних та екологічних поліпшень. Лінійна модель, що базується на принципі "взяти, зробити, викинути", призводить до швидкого виснаження природних ресурсів і накопичення відходів. Натомість, циклічна економіка передбачає збереження матеріалів у виробничому циклі якомога довше, що сприяє зменшенню відходів і ефективнішому використанню ресурсів.

Соціальні поліпшення включають створення додаткових робочих місць у галузях, пов'язаних з переробкою, ремонтом та повторним використанням матеріалів. Це стимулює розвиток локальних економік і сприяє підвищенню рівня життя в громадах. Крім того, зменшення відходів і забруднення покращує якість життя, знижує ризики для здоров'я та сприяє створенню більш чистого і безпечного середовища.

Екологічні поліпшення включають зменшення викидів парникових газів, зниження рівня забруднення води та ґрунтів, а також збереження біорізноманіття. Циклічна економіка сприяє збереженню природних ресурсів для майбутніх поколінь і допомагає у боротьбі зі зміною клімату.

Таким чином, технології переробки та повторного використання твердих відходів є ключовими елементами переходу до циклічної економіки, яка приносить значні соціальні та екологічні переваги порівняно з традиційною

лінійною економікою. Циклічна економіка також сприяє розвитку нових технологій та інновацій, оскільки вона ставить перед собою завдання не лише забезпечити вторинне використання ресурсів, а й стимулювати пошук більш ефективних та сталих методів обробки та використання матеріалів. В умовах циклічної економіки компанії та дослідницькі установи активно розробляють нові технології для підвищення ефективності виробництва та зменшення відходів. Наприклад, це можуть бути методи рециклінгу, що дозволяють відновлювати та повторно використовувати матеріали, які раніше вважалися непридатними для повторного використання.

Такий підхід сприяє відкриттю нових можливостей для сталого розвитку та покращення якості навколишнього середовища. Розробка біорозкладних матеріалів або створення більш довговічних та міцних продуктів зменшує навантаження на природні ресурси та знижує рівень забруднення. Крім того, розвиток цифрових технологій дозволяє створювати розумні системи управління ресурсами, що підвищують ефективність використання енергії та матеріалів на всіх етапах виробничого циклу.

Інновації в області циклічної економіки також можуть сприяти створенню нових бізнес-моделей, таких як моделі сервісного типу, де продукти не продаються, а надаються в оренду або як послуга. Це дозволяє зменшити потребу в виробництві нових товарів і, відповідно, зменшити споживання природних ресурсів та кількість відходів. У свою чергу, це стимулює розвиток нових підходів до дизайну продукції, щоб зробити її більш придатною для багаторазового використання та легшою в ремонті чи модернізації.

В результаті, циклічна економіка не лише допомагає зберігати ресурси та захищати довкілля, але й стимулює розвиток технологій та інновацій, що робить її важливим елементом сучасної економічної та екологічної політики.

Існує багато концепцій функціонування циклічної економіки [47]. Крім того, дослідники запропонували підхід до економічної переробки [48]. Однак концепція циклічної економіки не була загально визначена до 2013 року. Циклічна економіка спрямована на не лише на зменшення відходів у процесі виробництва та розподілу цих відходів, а також на створення умов для успішної переробки продуктів після їх використання[49]. Рамкова директива щодо відходів [50] ще покращила інтеграцію між циклічною економікою та управлінням відходами.

Деякі стратегії циклічної економіки можуть створювати екологічні системи управління відходами, які максимізують економічну ефективність, зменшують споживання ресурсів і запобігають забрудненню навколишнього середовища. Стратегія циклічної економіки добре узгоджується з ціллю вирішення проблеми зміни клімату. Це може зменшити викиди вуглецю в промисловості, при утилізації відходів, споживанні енергії, будівництві та транспорті, тим самим пом’якшуючи глобальні зміни клімату. Це може покращити якість повітря та води, зменшити споживання енергії та природних ресурсів, а також ефективно та розумно утилізувати тверді та токсичні відходи.

Висновки. За прогнозами об’єми виробництва полімерів до 2050 року приблизно зростуть у три рази відповідно зростуть і об’єми полімерних відходів. Тому проблема утилізації та переробки полімерних відходів з кожним днем стає все актуальнішою. Методи утилізації, а саме захоронення та спалювання є найдешевшими але несуть значні ризики забруднення навколишнього середовища. Ще однією тенденцією боротьби з полімерними відходами розглядають використання біополімерів, що можуть розкладатись під дією мікроорганізмів. Проте біополімери розкладаються за певних умов і вони не володіють достатнім спектром властивостей, щоб замінити традиційні широковживані пластики у сферах не пов’язаних з одноразовими виробами та упаковкою. Лише повторна переробка полімерних відходів з повторним цільовим застосуванням може вирішити важливу проблему утилізації полімерних відходів.

Пластикові відходи створюють серйозні екологічні проблеми через свою довговічність і стійкість до розкладання. Пластикові вироби можуть розпадатися на мікропластики, які потрапляють в океани, річки і навіть в повітря, завдаючи шкоди тваринам і рослинам. Мікропластики також можуть потрапляти в харчові ланцюги, що становить ризик для здоров'я людини.

Збільшення виробництва полімерів за останні роки підкреслює необхідність впровадження ефективних методів управління пластиковими відходами. Традиційні методи утилізації, такі як спалювання і захоронення на звалищах, не є екологічними рішеннями. Вони

призводять до викидів токсичних речовин і забруднення ґрунтів та водних ресурсів.

Одним із ключових підходів до вирішення проблеми полімерних відходів є розробка технологій переробки унікальних видів пластиків. Інноваційні методи переробки дозволяють не лише зменшити обсяги відходів, але й створювати нові продукти з перероблених матеріалів, що зменшує потребу у виробництві нових полімерів. Наприклад, технології хімічного рециклінгу дозволяють розкладати пластики на їх основні компоненти, які потім можуть бути використані для виробництва нових пластикових виробів. Це створює замкнутий цикл використання матеріалів, який є основою циклічної економіки.

Крім того, розробка біологічно розкладних полімерів є ще одним перспективним напрямком. Розкладні полімери можуть бути задіяні у природних процесах, що зменшує їх вплив на довкілля. Такі матеріали можуть використовуватися у виробництві пакування, одноразового посуду та інших виробів, що зменшує об’єми полімерів, які потрапляють на у природне середовище, за умови створення умов, що є необхідними для їх розкладу.

Отже, зростання виробництва полімерних матеріалів та проблема пластикових відходів вимагають комплексного підходу, що включає розвиток технологій переробки, використання біорозкладаних матеріалів та впровадження принципів циклічної економіки. Це дозволить зменшити негативний вплив пластикових відходів на довкілля та сприятиме сталому розвитку.

Вторинна переробка та повторне використання твердих відходів може бути частковим або повним рішенням проблеми дефіциту природних ресурсів, та захисту навколишнього середовища. Підхід циклічної економіки, порівняно з традиційною економікою, забезпечує більші соціальні та екологічні виграші, сприяючи перетворенню відходів у цінну сировину для промисловості.

Література

1. Harvey, J. A., Tougeron, K., Gols, R., Heinen, R., Abarca, M., Abram, P. K., ... & Chown, S. L. Scientists' warning on climate change and insects. Ecological monographs, 2023. 93(1), e1553.
2. Yang, M., Chen, L., Wang, J., Msigwa, G., Osman, A. I., Fawzy, S., ... & Yap, P. S. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. Environmental Chemistry Letters, 2023. 21(1), 55-80.
3. Abarca, M., Larsen, E. A., & Ries, L. Heatwaves and novel host consumption increase overwinter mortality of an imperiled wetland butterfly. Frontiers in Ecology and Evolution, 2019. 7, 193.
4. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, 2015. 347(6223), 1259855.
5. Venter, O., Sanderson, E. W., Magrach, A., Allan, J. R., Beher, J., Jones, K. R., ... & Watson, J. E. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. Nature communications, 2016. 7(1), 12558.
6. Cooper, D. R., & Gutowski, T. G. The environmental impacts of reuse: a review. Journal of Industrial Ecology, 2017. 21(1), 38-56.
7. Guerrero, M. Hogland, 2013 Guerrero L., Mass G., Hogland W. Solid waste management, Waste Management, 2013. 33(1), 220-232.
8. Aguilar-Hernandez, G. A., Sigüenza-Sanchez, C. P., Donati, F., Merciai, S., Schmidt, J., Rodrigues, J. F., & Tukker, A. The circularity gap of nations: A multiregional analysis of waste generation, recovery, and stock depletion in 2011. Resources, Conservation and Recycling, 2019. 151, 104452.
9. United states Environmental Protection Agency National overview: facts and figures on materials, wastes and recycling. https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials. Accessed April 25, 2015. 2022
10. Zhu Y, Zhang Y, Luo D, Chong Z, Li E, Kong X A review of municipal solid waste in China: characteristics, compositions, influential factors and treatment technologies. Environ Dev Sustain 2021. 23:6603–6622. https://doi.org/10.1007/s10668-020-00959-9
11. Li J, Xiao F, Zhang L, Amirkhanian SN. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: a review. J Clean Prod 2019. 233:1182–1206. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061
12. Abdel-Shafy HI, Mansour MSM. Solid waste issue: sources, composition, disposal, recycling, and valorization. Egypt J Pet 27:1275–1290. 2018. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003
13. Chen L, Wang L, Cho D-W, Tsang DCW, Tong L, Zhou Y, Yang J, Hu Q, Poon CS Sustainable stabilization/solidification of municipal solid waste incinerator fly ash by incorporation of green materials. J Clean Prod 222:335–343. 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.057
14. Ibrahim MIM, Mohamed NAEM Towards sustainable management of solid waste in Egypt. Procedia Environ Sci 34:336–347. 2016. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.030
15. Evode, S.A. Qamar, M. Bilal, D. Barceló, H.M. Iqba l Plastic waste and its management strategies for

environmental sustainability Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 4. 2021, Article 100142
16. Y.-Y. Lai, Y.-M. Lee Management strategy of plastic wastes in Taiwan Sustainable Environment Research, 32 (2022), pp. 1-10
17. Z. Yuan, R. Nag, E. Cummins Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment - from marine to food systems Sci Total Environ, 823 (2022), Article 153730
18. P. Emenike, O. Araoye, S. Academe, P. Unokiwedi, D. Omole The effects of microplastics in oceans and marine environment on public health–a mini-review IOP conference series: earth and environmental science, IOP Publishing, 2022. Article 012019
19. Y. Chen, S. Selvinsimpson Current trends, challenges, and opportunities for plastic recycling Plastic and Microplastic in the Environment: Management and Health Risks, 2022, Pp. 205-221
20. D. Pan, F. Su, C. Liu, Z. Guo Research progress for plastic waste management and manufacture of value-added products Advanced Composites and Hybrid Materials, 3, 2020, Pp. 443-461
21. Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci. Adv. 3, 2017. e1700782.
22. T. Astrup, J. Møller, T. Fruergaard Incineration and co-combustion of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions Waste Manag Res, 27, 2009. Pp. 789-799
23. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances, 3(7), 2017. e1700782.
24. Geyer, R. Production, use, and fate of synthetic polymers. In Plastic waste and recycling, 2020. Pp. 13-32. Academic Press.
25. Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Alvarez, J., Bilbao, J., & Olazar, M. Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. 82, 576-596.
26. Kan, M. Dynamic flows and stocks of plastics in the United States and pathways towards zero plastic pollution by 2050 (Doctoral dissertation), 2021.
27. Heller, M. C., Mazor, M. H., & Keoleian, G. A. Plastics in the US: toward a material flow characterization of production, markets and end of life. Environmental Research Letters, 2020. 15(9), 094034.
28. Jiang, X., Wang, T., Jiang, M., Xu, M., Yu, Y., Guo, B., ... & Zhu, B. Assessment of plastic stocks and flows in China: 1978-2017. Resources, Conservation and Recycling, 2020. 161, 104969.
29. P.O. Awoyera, J.M. Ndambuki, J.O. Akinmusuru, D.O. Omole Characterization of ceramic waste aggregate concrete HBRC journal, 14. 2018. Pp. 282-287
30. P.O. Awoyera, A. Adesina Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective Case Stud Constr Mater, 12, 2020. Article e00330
31. J.N. Hahladakis, E. Iacovidou An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling J Hazard Mater, 380, 2019, Article 120887
32. N. Singh, D. Hui, R.Singh, I.Ahuja, L.Feo, F.Fraternali Recycling of plastic solid waste: a state of art review and future applications Compos B Eng, 115, 2017. Pp. 409-422
33. S. Serranti, G. Bonifazi Techniques for separation of plastic wastes Use of recycled plastics in eco-efficient concrete, Elsevier, 2019. Pp. 9-37
34. O. Kho, H. Hsien LCA of plastic waste recovery into recycled materials Energy and Fuels in Singapore, 145, 2019. P. 67
35. Y. Aryan, P. Yadav, S.R. Samadder Life Cycle Assessment of the existing and proposed plastic waste management options in India: a case study J Clean Prod, 211 (2019), pp. 1268-1283
36. R.V. de Camargo, C. Saron Mechanical–chemical recycling of low-density polyethylene waste with polypropylene J Polym Environ, 28, 2020. Pp. 794-802
37. M.Y. Khalid, Z.U. Arif, W. Ahmed, H. Arshad Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials Sustainable Materials and Technologies, 2021, Article e00382
38. F. Khalid, J. Irwan, M.W. Ibrahim, N. Othman, S. Shahidan Performance of plastic wastes in fiber-reinforced concrete beams Construct Build Mater, 183, 2018. Pp. 451-464
39. M.L. Henriksen, C.B. Karlsen, P.Klarskov, M. Hinge Plastic classification via in-line hyperspectral camera analysis and unsupervised machine learning Vib Spectrosc, 118, 2022, Article 103329
40. S. Serranti, V. Luciani, G. Bonifazi, B. Hu, P.C. Rem An innovative recycling process to obtain pure polyethylene and polypropylene from household waste Waste Manag, 35, 2015. Pp. 12-20
41. X. Song, W. Hu, W. Huang, H. Wang, S. Yan, S. Yu, F. Liu Methanolysis of polycarbonate into valuable product bisphenol A using choline chloride-based deep eutectic solvents as highly active catalysts Chem Eng J, 388, 2020. Article 124324
42. J.-S. Bae, S.-K. Oh, W. Pedrycz, Z. Fu Design of fuzzy radial basis function neural network classifier based on information data preprocessing for recycling black plastic wastes: comparative studies of ATR FT-IR and Raman spectroscopy Appl Intell, 49, 2019. Pp. 929-949
43. Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences, 364(1526), 2127-2139.
44. Šprajcar, M., Horvat, P., & Kržan, A. Biopolymers and bioplastics: plastics aligned with nature. Ljubljana: National Institute of Chemistry, 2012.

45. Yamamoto, M., Witt, U., Skupin, G., Beimborn, D., & Müller, R. J. Biodegradable aliphatic-aromatic polyesters:“Ecoflex®”. Biopolymers Online: Biology• Chemistry• Biotechnology• Applications, 4, 2005.
46. Kiran, E. U., Stamatelatou, K., Antonopoulou, G., & Lyberatos, G. Production of biogas via anaerobic digestion. In Handbook of biofuels production, 2016. (pp. 259-301). Woodhead Publishing.
47. Adami, L., & Schiavon, M. From circular economy to circular ecology: a review on the solution of environmental problems through circular waste management approaches. *Sustainability*, 2021. *13*(2), 925.
48. Leontief, W. The economy as a circular flow. *Structural change and economic dynamics*, 1991. *2*(1), 181-212.
49. Yang, M., Chen, L., Wang, J. et al. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. Environ Chem Lett 21, 2023. 55–80. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6
50. European Union Directive 2008/98/EC of The European Parliament and of The Council. 2008. https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN. Accessed April

Savchuk B.P., Pushkarov D.V. Methods of polymeric waste processing

An analysis of existing methods of recycling plastic waste, such as landfilling, incineration, mechanical and chemical processing, was conducted. The advantages and disadvantages of existing methods of recycling and recycling plastic waste in different parts of the world were shown. Thus, landfilling and incineration are the most common and cheapest methods of recycling polymer waste. Landfilling only leads to the accumulation of waste in landfills, and incineration of polymer waste allows you to regenerate a significant amount of energy that can be used in various industries. However, incineration generates excessive greenhouse gas emissions into the atmosphere, which negatively affects the environment. Mechanical and chemical processing of polymer waste allows you to reduce waste volumes and reuse materials. However, when processing plastics, the problem of sorting waste is important, which complicates the processing of plastic mixtures and reduces the efficiency of using these technologies.

A search was conducted for new approaches in the processes of recycling and processing of polymer waste, which will allow to implement the principles of cyclical use of materials.

The features of the processes of processing different types of polymer materials by mechanical and chemical processing methods with preliminary sorting by type were considered. The possibilities of reusing the obtained products of processing polymer materials were established. The possibility of using biopolymers to solve the problem of recycling polymer waste was analyzed. The possibility of applying the principles of a circular economy to the organization of processing of biopolymer waste was considered. The possibility of effectively combining complex solutions in the direction of polymer waste management while implementing the principles of lean production was shown.

A comprehensive approach to the processing of synthetic and biopolymer polymer waste by converting them into products suitable for reuse using modern methods and approaches, digital technologies and new concepts was proposed. The use of digitalization elements in organizing the processing of polymer waste will allow these technologies to be transferred to the next stage of development to ensure sustainable development and improve the environmental situation.

Keywords: *polymer waste, circular economy, recycling technologies, synthetic polymers, biodegradable polymers.*

Савчук Богдан Петрович – аспірант, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, bohdan.sav95@gmail.com
Пушкарьов Денис Вікторович – аспірант, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, global23412@gmail.com

Стаття подана 22.01.2025

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-77-82

УДК 678.753.74.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЦИКЛІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ПВХ КОМПОЗИТІВ

Савчук А.П., Федорів Т.Р.

STUDY OF CYCLIC PROCESSING OF PVC COMPOSITES

Savchuk A.P., Fedoriv T.R.

У роботі досліджено вплив пластифікаторів і наповнювачів на процес циклічної переробки жорсткої ПВХ композиції. Процес багатократної переробки жорсткої ПВХ композиції був змодельований за допомогою методики циклічної переробки на лабораторному устаткуванні з використанням одношнекового екструдера. В процесі циклічної переробки проводили вимірювання фізико-механічних і реологічних характеристик ПВХ композитів, таких як міцність на розрив відносне видовження та показник течії розплаву. Зокрема, було оцінено стабільність механічних властивостей та показника течії розплаву при додаванні пластифікатора та наповнювача, таких як діізононілфталат і карбонат кальцію відповідно. Встановлено, що введення 1 масової частини діізононілфталату дозволяє зберігати стабільними механічні характеристики ПВХ композиту протягом п'яти циклів переробки, що є важливим для підтримки постійних експлуатаційних властивостей матеріалу в умовах багаторазової переробки. Крім того, при додаванні карбонату кальцію в кількості до 10 масових частин зберігаються високі механічні властивості ПВХ композиту впродовж 5 циклів переробки, що дозволяє значно підвищити ефективність його використання в процесах циклічної переробки. Встановлено, що раціональні концентрації пластифікаторів і наповнювачів дозволяють значно поліпшити реологічні характеристики, зокрема, підвищення показника ПТР, що полегшує переробку ПВХ композиту в процесі екструзії та знижує енергетичні витрати при його переробці. В роботі запропоновано нову методику циклічної переробки жорсткої ПВХ композиції з додаванням до рецептури раціональної кількості пластифікатора та наповнювача. Дана методика дозволяє зберігати стабільність властивостей матеріалу протягом п'яти циклів переробки, що робить її економічно ефективною для використання в умовах виробництва з обмеженими ресурсами. Отримані результати є важливими для розробки технологій багаторазової переробки полімерних матеріалів, що відповідають принципам циклічної економіки, та можуть бути впроваджені у виробництво первинних ПВХ виробів з високими вимогами до експлуатаційних характеристик.

Ключові слова: *полівінілхлорид, фізична модифікація, пластифікатор, наповнювач, циклічна переробка, діізононілфталат, карбонат кальцію.*

Вступ. Полівінілхлорид (ПВХ) є одним із найбільш універсальних і поширених полімерів завдяки його високій механічній міцності, тривалій експлуатаційній витривалості, хімічній стійкості та економічній доступності [1-6]. Однак жорсткий ПВХ у своєму первинному стані має крихку структуру, що обмежує його застосування у виробах, які піддаються значним динамічним навантаженням або використовуються в екстремальних умовах [7]. Для розширення сфер використання ПВХ піддають фізичній модифікації, що передбачає зміни його фізико-механічних властивостей без зміни хімічної структури полімеру [8]. Фізична модифікація спрямована на покращення міцності, гнучкості, ударної в'язкості та інших експлуатаційних характеристик матеріалу [9].

Основними методами фізичної модифікації є додавання стабілізаторів, наповнювачів, пластифікаторів [10]. Щоб запобігти процесу деструкції ПВХ під час переробки використовують термостабілізатори [11]. Основні термостабілізатори, які зараз використовуються це солі металів та металеві мила, наприклад кальцій-цинковий стабілізатор. Даний стабілізатор це комплексна сполука, що складається з солей кальцію і

цинку. Пластифікатори, такі як діізононілфталат (ДІНП), покращують гнучкість і знижують жорсткість полімерної матриці, що дозволяє використовувати ПВХ у більш широкому діапазоні умов експлуатації [12]. Наповнювачі, зокрема карбонат кальцію (крейда), застосовуються для підвищення жорсткості та термостабільності, а також для зниження вартості композиції [13].

Враховуючи широкий спектр можливих методів фізичної модифікації важливою задачею являється підбір оптимальних параметрів модифікаторів, що дозволяє виготовляти якісну продукцію та потім повторно та багаторазово її переробляти без втрати якості експлуатаційних характеристик та мінімізації процесів деструкції у ПВХ композиті.

Дослідження спрямоване на визначення впливу пластифікаторів та наповнювачів на багаторазову переробку жорсткого ПВХ композиту.

Постановка завдання. З кожним роком кількість відходів ПВХ тільки зростає і лише не значна їх кількість переробляється. Складність переробки таких відходів полягає у недостатній початковій стабілізації ПВХ композитів, не розрахованих на багаторазову повторну переробку. Тому важливою задачею є розробка нової стратегії виробництва ПВХ композитів та переробки існуючих відходів, яка буде закладати можливість багаторазової переробки в умовах циклічної економіки. Дану проблему можна вирішити додаванням раціональної кількості та співвідношення добавок таких як стабілізатори, пластифікатори, наповнювачі до ПВХ композиту. Тому важливим аспектом є вивчення впливу пластифікаторів та наповнювачів на багаторазову переробку жорстких ПВХ композитів.

Мета роботи. Дослідження впливу пластифікаторів і наповнювачів на процес циклічної переробки жорсткої ПВХ композиції.

Матеріали і методи. У роботі було використано полівінілхлорид марки VYNOVA S6706 (Vynova Group, Бельгія). Для забезпечення термостабільності матеріалу стабілізатор кальцій/цинковий BAEROPAN MC 91424 FP/1 (виробник Baerlocher Kimya San. Tic. Ltd. Şti. Akhisar Şubesi, Турція). Для зменшення тертя під час переробки та покращення текучості розплаву додавали поліетиленовий віск Licowax PE 520 (Clariant, Німеччина). В якості наповнювача застосовували карбонат кальцію Omyacarb 2T – KA (KARABIGA, Турція) [7]. Роль пластифікатора виконував діізононілфталат LG Chem DOP (LG Chem, Південна Корея).

Дослідження базувалося на стандартній базовій рецептурі ПВХ-компаунду (табл. 1) з оптимальною кількістю стабілізатору для багаторазової переробки (не менше 5 циклів переробки). Такий компаунд можливо використовувати для виготовлення віконного профілю, що допускає багаторазову переробку.

Таблиця 1

Базова рецептура ПВХ композиції

Компонент	Марка	Масові частини
ПВХ	S6706	100
Карбонат кальцію	Omyacarb 2T - KA	5
Стабілізатор, кальцій/цинк	BP MC 91424 FP/1	4
Поліетиленовий віск	Licowax PE 520	0.5

У базовій рецептурі регулювали концентрацію наповнювача карбонату кальцію збільшуючи до 10, 20, 30 масових частин та додавали пластифікатор діізононілфталат у кількості 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 масових частин, для визначення оптимальних параметрів добавок в умовах багаторазової переробки. У отриманих ПВХ композитах визначали механічні та реологічні характеристики.

Приготування зразків. На першому етапі порошкові вихідні компоненти ПВХ-композиції змішували у високошвидкісному міксері, щоб отримати однорідну порошкову масу. У міксер HKN-SG400 Hurakan для цього завантажували ПВХ-порошок і стабілізатор, які перемішували протягом трьох хвилин на швидкості 10–15 тисяч обертів за хвилину. При цьому порошкова суміш розігрівалася до температури 100–110°C, що забезпечувало плавлення та рівномірний розподіл модифікаторів.

Потім додавали інші складники рецептури, такі як крейда та пластифікатор, і продовжували змішування ще дві хвилини. Отриману порошкову суміш гранулювали на одношнековому екструдері з діаметром шнеку 25 мм і співвідношенням L/D = 16. Зона завантаження мала пазовану конструкцію, у якості формувального оснащення використовувалася голівка отвором 3 мм, що забезпечувало формування стренги з розплаву (Рис. 1).

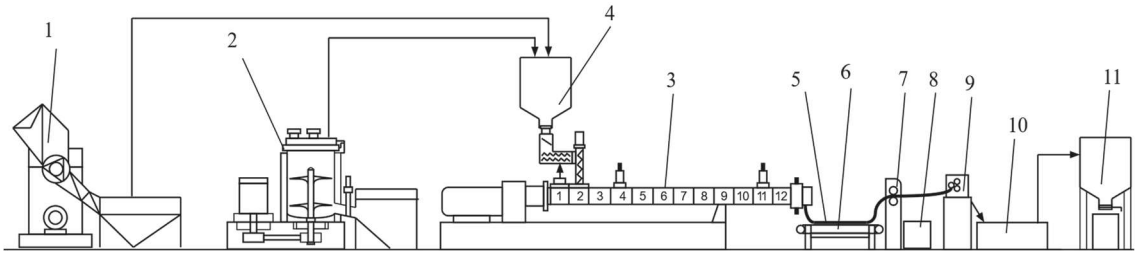


Рис. 1. Лабораторна схема виготовлення зразків ПВХ композитів
: 1 – ножова дробарка; 2 – високошвидкісний міксер HKN-SG400 Hurakan; 3 – одношнековий екструдер; 4 – бункер з дозатором; 5 – ПВХ стренга або стрічка; 6 – стрічковий транспортер; 7 – тягнучий пристрій; 8 – ємність для стрічки ПВХ; 9 – стренгогранулятор; 10 – ємність для грануляту ПВХ; 11 – бункерна сушка

Температурний профіль екструдера 180-195-190-185 °С. Стренга охолоджувалася у повітрі на рухомому стрічковому транспортері, після чого подрібнювалася на стренго грануляторі. Гранульована ПВХ композиція використовувалася для виготовлення стрічки, для чого екструдер оснащувався щілинною формувальною голівкою шириною 24 мм та товщиною 1 мм. Стрічка приймалися на рухому транспортерну стрічку, оснащену металевим роликом. Пласка стрічка з ПВХ композиції одержувалася шириною 20мм та товщиною 0,8 – 0,9 мм, після витримки впродовж 12 годин здійснювалося висікання зразків для механічних випробувань на гідравлічному пресі. Стрічка підлягала подрібненню на стренго грануляторі та ножовій дробарці з застосуванням сітки з отворами діаметром 4 мм, одержаний подрібнений матеріал мав високу сипучість та насипну густину, подібно до грануляту, та використовувався для повторного виготовлення стрічки.

Повторну переробку здійснювали до п’яти циклів, щоб проаналізувати вплив переробки на механічні та реологічні властивості матеріалу.

Реологічні характеристики. Пластифікатори вводяться до складу жорсткого ПВХ для зменшення внутрішніх сил між макромолекулами, що забезпечує підвищення гнучкості та еластичності матеріалу. Проте їхня концентрація повинна бути ретельно оптимізована, оскільки надлишок пластифікатора може спричиняти розбалансування структури полімерної матриці, що негативно позначається на механічних властивостях, зокрема ударній міцності. Реологічні властивості, такі як показник течії розплаву (ПТР), також залежать від кількості пластифікатора, оскільки він впливає на текучість матеріалу при переробці.

Процес вимірювання показника течії розплаву проводився відповідно до стандартів ASTM D1238 та ISO R1133. У роботі використовували капілярний віскозиметр постійного тиску типу ИИРТ–М. Умови проведення дослідження: температура вимірювання становила 170 ± 0,5 °С; маса вантажу дорівнювала 5,0 кг.

Визначення механічних властивостей при розриві. Для визначення механічних властивостей при розтягуванні було використано стандарт ISO 527-2:2012. Випробування проводили на розривній машині типу ZD–10. Кожен зразок досліджували не менш ніж у п'яти тестах, що дозволяло отримати середні значення механічних характеристик для забезпечення статистичної достовірності.

Визначення густини композитів. Визначення густини відбувалось згідно стандарту ISO 1183-1:2019 методи визначення щільності непористих пластмас методом рідинного пікнометра.

Результати дослідження. У базову рецептуру ПВХ композиту додавали по черзі пластифікатор та наповнювач та досліджували вплив кожної добавки на реологічні та механічні характеристики.

Введення пластифікатору дозволяє збільшити ПТР розплаву (табл. 2) таким чином покращити його переробку. Пластифікатори знижують температуру переробки ПВХ композиту і частково виконують роль стабілізаторів, запобігаючи термодеградації ПВХ під час нагрівання.

При вмісті пластифікатору 0,5 мас. ПТР ПВХ композиту при багаторазовій переробці зменшується. Зменшення ПТР композитів може бути пов’язано з термоокиснювальною деградацією, що призводить до утворення гелеподібних структур в структурі композиту. При збільшенні вмісту пластифікатора до 1 мас. частини і більше ПТР композиту майже не змінюється при багаторазовій переробці впродовж 5 циклів.

Таблиця 2

Залежність ПТР базового ПВХ композиту від вмісту пластифікатору та циклів переробки

Вміст пластифікатору, мас. частин	ПТР, г/10хв				
	1 цикл	2 цикл	3 цикл	4 цикл	5 цикл
0	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0
0,5	1,4	1,45	1,4	1,3	1,2
1,0	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6
1,5	1,9	2,1	2,0	2,0	2,1
2,0	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4

Введення пластифікатора в ПВХ композит значно впливає на його механічні властивості (табл. 3). Основні ефекти пов'язані зі зменшенням міжмолекулярних взаємодій у полімері, що робить його більш еластичним, але менш жорстким і міцним.

Таблиця 3

Вплив вмісту пластифікатора на механічні властивості базового ПВХ композиту від циклу переробки

Показник	Цикл переробки	Вміст пластифікатора, мас. част.				
		0	0,5	1,0	1,5	2,0
Міцність при розриві, МПа	1	28	27	24	22	20
	2	29	28	24	22	21
	3	28	28	24	22	20
	4	26	27	23	21	20
	5	26	27	23	20	20
Відносне видовження, %	1	26	30	36	50	65
	2	28	31	38	55	68
	3	22	28	38	56	66
	4	20	27	33	45	60
	5	17	25	35	44	56
Густина, кг/м^3	1	1406	1404	1401	1398	1395
	2	1403	1403	1400	1397	1395
	3	1401	1404	1400	1397	1395
	4	1402	1402	1401	1397	1394
	5	1402	1402	1401	1397	1395

При збільшенні вмісту пластифікатора з 0 мас. част. до 2 мас. част. у ПВХ композиті спостерігається зменшення міцності на розрив від 28 МПа до 20 МПа та збільшення відносного видовження композиту від 26% до 65% а також зниження густини від 1,406 г/см^3 до 1,395 г/см^3. Проте варто зазначити, що при повторній переробці впродовж 5 циклів за відсутності пластифікатора або вмісті меншому за 1 мас. частину відбувається погіршення механічних характеристик. Лише при збільшенні вмісту пластифікатору від 1 мас. частини при повторній циклічній переробці механічні характеристики залишаються достатньо стабільними.

Таким чином ведення від 1 мас. частини пластифікатору у базовий ПВХ композит дозволяє оптимально стабілізувати реологічні та механічні характеристики при багаторазовій переробці впродовж 5 циклів.

Як відомо наповнювачі впливають на фізико-механічні властивості ПВХ композитів. Їх використовують для покращення характеристик матеріалу, зниження вартості кінцевого продукту та надання йому бажаних властивостей. При веденні карбонату кальцію значно знижує ПТР розплаву ПВХ композиту (табл. 4). Також карбонат кальцію покращує термостабільність, він не замінює основні термостабілізатори, але доповнює їх дію, особливо у складі економічно доцільних композицій ПВХ.

Таблиця 4

Залежність ПТР базового ПВХ композиту від вмісту наповнювача карбонату кальцію та кількості циклів переробки

Вміст наповнювача мас. частин	ПТР, г/10хв				
	1 цикл	2 цикл	3 цикл	4 цикл	5 цикл
5	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0
10	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1
20	0,8	0,9	0,9	0,7	0,7
30	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7

Ведення карбонату кальцію дозволяє стабілізувати реологічні властивості ПВХ композиту при багаторазовій переробці. При додаванні 10 масових частин карбонату кальцію і більше ПТР ПВХ композитів в процесі багаторазової переробки залишається стабільним приблизно на рівні 1,1 г/10хв для 10 мас. частин та 0,8 г/10хв та 0,7 г/10хв для 20 мас. частин та 30 мас. частин відповідно.

Також помірне введення карбонату кальцію дозволяє покращити деякі механічні характеристики, хоча при цьому відбувається збільшення густини композиту (табл. 5).

При збільшенні вмісту до 10 мас. частин карбонату кальцію у базовому ПВХ композиті спостерігається незначне збільшення відносного видовження. Подальше збільшення вмісту карбонату кальцію призводить до зниження механічних властивостей та подальшому збільшенню густини від 1406 кг/м^3

при наповненні 5 мас. частин до 1545 кг/м^3 30 мас. частин.

Таблиця 5

Вплив вмісту наповнювача на механічні властивості базового ПВХ композиту від циклу переробки

Показник	Цикл переробки	Вміст наповнювача, мас. част.			
		5	10	20	30
Міцність при розриві, МПа	1	28	29	26	24
	2	29	28	26	25
	3	28	28	24	24
	4	26	26	22	23
	5	26	25	22	21
Відносне видовження, %	1	26	28	24	20
	2	28	29	25	21
	3	22	28	23	21
	4	20	26	23	20
	5	17	26	22	18
Густина, кг/м^3	1	1406	1437	1493	1545
	2	1403	1437	1493	1545
	3	1401	1435	1493	1544
	4	1402	1434	1491	1544
	5	1402	1435	1490	1544

Таким чином, визначено раціональний склад ПВХ-компаундів, з додаванням пластифікатора діізононілфталату та наповнювача карбонату кальцію, що забезпечує стабільні механічні властивості і мінімізує деградацію при багаторазовій переробці впродовж 5 циклів. Раціональний вміст діізононілфталату у базовому ПВХ композиті складає 1 мас. частину, а карбонату кальцію 10 мас. частин.

Висновки. На основі проведених досліджень було встановлено вплив пластифікатора діізононілфталату і наповнювача карбонату кальцію, на процеси циклічної переробки ПВХ композитів. Визначено реологічні та механічні характеристики отриманих ПВХ композитів, що дозволяють оцінити ступінь стабільності композитів в процесі багаторазової переробки.

Встановлено, що вміст пластифікатора 1 мас. частин дозволяє підвищити термостабільність ПВХ композиції в процесі циклічної переробки без значного зниження міцності. Подальше збільшення кількості пластифікатора спричиняє погіршення механічних характеристик жорсткого ПВХ через порушення структурної гармонії полімерної матриці та є економічно недоцільним у рамках циклічної економіки.

Карбонат кальцію як інертний наповнювач дозволяє забезпечити стабільність властивостей ПВХ композиції під час циклічної переробки, та дозволяє зменшити вміст синтетичного полімеру, необхідного для виробництва виробів. Додавання наповнювача до рівня 10 мас. частин дозволяє зберігати високі механічні характеристики навіть після п’яти циклів переробки. Крім того, наповнювач сприяє зниженню вартості матеріалу та збереженні його властивостей. Однак при збільшенні її концентрації до 20% спостерігається зниження ПТР та міцності в процесах багаторазової переробки. Це обмежує використання такого складу для виробів, які зазнають значних динамічних навантажень та ускладнює їх переробку.

Отримані результати демонструють, що збалансоване використання пластифікатору діізононілфталату і наповнювача карбонату кальцію дозволяє зберігати експлуатаційні властивості ПВХ композиту навіть після багаторазового перероблення впродовж 5 циклів, що відповідає вимогам циклічної економіки.

Література

1. Lahl, U., & Zeschmar-Lahl, B. More than 30 Years of PVC Recycling in Europe—A Critical Inventory. *Sustainability*, 2024. *16*(9), 3854.
2. Ait-Touchente, Zouhair, et al. "Recent advances in polyvinyl chloride (PVC) recycling." *Polymers for Advanced Technologies* 35.1, 2024. e6228.
3. Mathews, G. *PVC: production, properties and uses*. CRC Press. 2024.
4. Lewandowski, K., & Skórczewska, K. A brief review of poly (vinyl chloride)(PVC) recycling. *Polymers*, 2022. *14*(15), 3035.
5. Wypych, G. *PVC degradation and stabilization*. Elsevier. 2020.
6. Brockmann, W., Geiß, P. L., Klingen, J., & Schröder, K. B. *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. John Wiley & Sons. 2009.
7. Gomez, I. L. (Ed.). *Engineering with rigid PVC: processability and applications,* 1984. Vol. 6. CRC Press.
8. Daniels, C. A., & Plastisols, V. I. I. Modification of Poly (Vinyl Chloride). *PLASTICS ENGINEERING-NEW YORK-*, 2000. *60*, 351-430.
9. Titow, W. V. *PVC plastics: properties, processing, and applications*. Springer Science & Business Media. 2012.
10. Elgharbawy, A. Poly vinyl chloride additives and applications-a review. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 2022. *12*(3).

11. Zhang, H. and J. Zhang, Rheological behaviors of plasticized polyvinyl chloride thermally conductive composites with oriented flaky fillers: A case study on graphite and mica. Journal of Applied Polymer Science, 2022: P. 52186
12. Xia, X., Sun, M., Zhou, M., Chang, Z., & Li, L. Polyvinyl chloride microplastics induce growth inhibition and oxidative stress in Cyprinus carpio var. larvae. *Science of The Total Environment*, 2020. *716*, 136479.
13. Deng, X., Zhang, C., Chen, Y., Yan, Y., Liu, Y., & Chen, X. Crush behaviors of polyvinyl chloride cellular structures with liquid filler. *Composite Structures*, 2018. *189*, 428-434.

Savchuk A.P., Fedoriv T.R. Study of cyclic processing of PVC composites

The work investigated the influence of plasticizers and fillers on the process of cyclic processing of rigid PVC composition. The process of multiple processing of rigid PVC composition was modeled using the method of cyclic processing on laboratory equipment using a single-screw extruder. During the cyclic processing, measurements were made of the physicomechanical and rheological characteristics of PVC composites, such as tensile strength, relative elongation and melt flow index. In particular, the stability of mechanical properties and melt flow index was assessed when adding a plasticizer and filler, such as diisononyl phthalate and calcium carbonate, respectively. It was found that the introduction of 1 mass part of diisononyl phthalate allows maintaining stable mechanical characteristics of PVC composite during five processing cycles, which is important for maintaining constant operational properties of the material under conditions of multiple processing. In addition, when adding calcium carbonate in an amount of up to 10 mass parts, the high mechanical properties of the PVC composite are maintained for 5 processing cycles, which allows significantly increasing the efficiency of its use in cyclic processing processes. It has been established that rational concentrations of plasticizers and fillers allow significantly improving the rheological characteristics, in particular, increasing the PTR index, which facilitates the processing of the PVC composite during the extrusion process and reduces energy costs during its processing. The work proposes a new method for cyclic processing of a rigid PVC composition with the addition of a rational amount of plasticizer and filler to the formulation. This method allows maintaining the stability of the material properties for five processing cycles, which makes it cost-effective for use in production conditions with limited resources. The results obtained are important for the development of technologies for multiple recycling of polymer materials that meet the principles of the circular economy and can be implemented in the production of primary PVC products with high requirements for operational characteristics.

Keywords *polyvinyl chloride, physical modification, plasticizer, filler, cyclic recycling, diisononyl phthalate, calcium carbonate.*

.

Савчук Андрій Петрович – аспірант, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, a.savchuk@pvh.com.ua
Федорів Тарас Романович – аспірант, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, tfedo-riv04@gmail.com

Стаття подана 22.01.2025.

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-83-90

УДК 625.14: 656.25: 656.142

АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ І МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ ПІШОХОДІВ ПРИ ПЕРЕТИНІ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІЙ

Лесів Ю.З., Ковальчук В.В.

RELEVANCE OF PROVISION AND METHODS OF IMPROVING PEDESTRIAN TRAFFIC SAFETY AT RAILWAY CROSSING

Lesiv Yu.Z., Kovalchuk V.V.

Проведений аналіз динаміки аварійності на залізничному транспорті зі сторонніми особами, що виникли внаслідок наїзду рухомим складом з кожним роком зростає. Це пов'язано із збільшенням пішохідних потоків в урбанізованих містах, у яких залізниця розриває маршрути руху пішоходів, що в багатьох випадках призводить до порушень правил безпечного переходу пішоходами залізничних колій. Тому акутальною та своєчасною є задача забезпечення безпеки руху пішоходів при перетині залізничних колій. Метою статті є аналіз факторів та узагальнення методів, які впливають на забезпечення безпеки руху пішоходів при перетині залізничних колій в одному рівні Проаналізовано причини та фактори, які впливають на настання транспортних подій з учасниками руху при перетині залізничних колій. Встановлено, що основними причинами зростання аварійності з учасниками пішохідного руху в межах залізниці є несанціоновані переходи та відсутність засобів попередження транспортних подій. Проаналізовано сучасні методи, які впливають на забезпечення безпеки руху пішоходів при перетині залізничних колій. До них належать облаштування спеціальних пішохідних переходів із інформаційними, наочними та бар'єрними засобами попередження пішоходів про рух рухомого складу. Також встановлено, що на безпеку руху пішоходів впливають законодавчо-суспільні фактори в контексті питань формування безпечного середовища на залізницях. На основі аналізу світового досвіду та кращих практик підвищення безпеки руху на залізниці, у роботі запропоновано введення терміну «Залізничний пішохідний перехід» та його визначення. Наведено пропозиції розширення існуючої категорійності залізничних переїздів в Україні з поділом на пішохідний рух. Запропоновано рекомендації щодо удосконалення інфраструктури залізничних пішохідних переходів шляхом інтеграції інтелектуальних систем оповіщення та контролю. Визначено перспективні напрями досліджень у сфері підвищення безпеки руху на залізничних переходах, зокрема впровадження автоматизованих систем моніторингу та управління пішохідними потоками через залізничні колії.

Ключові слова: *безпека руху, залізничні пішохідні переходи, транспортні події, запобігання аваріям, інформаційні системи попередження, класифікація переїздів.*

Вступ. На залізничному транспорті існує безліч факторів, які можуть стати причиною залізничних транспортних подій. Існуючі моделі прогнозування [1] транспортних подій дають можливість врахувати одночасно лише частину факторів. Однак на транспортні події вплив мають фактори різного характеру походження, тому в конкретному випадку ці методи не можуть повністю задовольнити потребу в активному забезпеченні стану безпеки на залізничному транспорті. Оскільки вони лише передбачають виникнення або частоту аварій.

Однією з актуальних задач в Україні є забезпечення безпеки руху пішоходів при перетині залізничних колій в одному рівні. Особливо дане питання є актуальним в урбанізованих просторах. Оскільки останніми роками збільшились пасажирські потоки, що призвело до несанкціонованих перетинів

залізничних колій поза межами дозволених переходів [2]. Такі переходи часто виникають через необхідність перетину колії для мешканців до робочих місць чи громадських будівель, особливо в місцях де залізнична колія розриває пішохідні маршрути. Що у багатьох випадках призводить до травмування або навіть до летальних випадків учасників пішохідного руху. На рис. 1 наведено стан аварійності на залізничному транспорті за 2023 рік згідно даних Державної служби України з безпеки на транспорті. [1].

Згідно аналізу стану аварійності на залізничному транспорті за 2023 р. кількість аварій зі сторонніми особами, завдані рухомим складом залізничного транспорту, який переміщався трапилося 276 аварій, в яких 109 осіб було травмовано, а 168 осіб загинули. Динаміка аварійності на залізничному транспорті з кожним роком підвищується, а саме у 2023 р. підвищення кількості аварій на 10% більше у порівнянні з 2022 р., а кількість летальних випадків зросла на 7,7 %.

З аналізу статистики транспортних подій випливає, що забезпечення безпеки руху пішоходів при перетині залізничних колій є актуальним питанням. Підвищити стан безпеки можна шляхом влаштування залізничних пішохідних переходів. Однак ,будівництво переходів в Україні на законодавчому рівні не регламентуються [3]. Хоча на практиці такі переходи вже існують у великих містах [4–6]. Наприклад, на рис. 1 наведено існуючий залізничний пішохідний перехід на Львівській залізниці.

Влаштування залізничних пішохідних переходів, крім розриву маршруту пішоходів, призводить до забезпечення безпеки руху пішоходів. А враховуючи високу щільність житлової забудови біля залізничних колій, актуальність підвищення безпеки руху пішоходів з часом ще більше зросте.

У світовій практиці все частіше приділяють увагу підвищенню безпеки пішоходів при перетині залізничних колій. Однією з них є влаштування залізничних пішохідних переходів в одному рівні з залізничною колією, що регламентується на законодавчому рівні країн. Згідно Директиви 2004/49/ЄС [7] Європейського Парламенту та Ради «Про безпеку залізниць у Співтоваристві» визначено загальні показники безпеки, які включають: загальну та відносну (поїздо-кілометри) кількість транспортних подій та загальну і відносну кількість осіб, які отримали серйозні тілесні ушкодження. В тому числі на залізничних переїздах.

Рис. 1. Стан аварійності на залізничному транспорті за 2023 рік [1].

Рис. 2. Влаштований залізничний пішохідний перехід в одному рівні із залізничними коліями на Львівській залізниці [4]

У Великій Британії в 2021 р. Office of Rail and Road (ORR) спільно з Network Rail, Департаментом транспорту, транспортною поліцією розроблено посібник «Принципи управління безпекою залізничних переїздів» [8]. У посібнику наведено методи оцінки та контролю ризиків на всіх типах залізничних переїздів. Викладено низку принципів, які сприяють виявленню та контролю ризиків, а також наведено список ключових факторів, які впливають на безпеку на залізничних переїздах. Зазначено, що такі фактори, як людський, залізничний, автомобільний є основними та ключовими. Вони враховуються в моменті проектування та експлуатації залізничних переїздів.

У США відповідальні за оцінку ризиків перетину рівня та прийняття рішень щодо встановлення типів попереджувальних пристроїв державні дорожні органи, а не залізничні оператори [9]. При цьому в Україні за безпеку руху на залізничних переїздах відповідають структурні підрозділи АТ «Укрзалізниця».

Мета роботи полягає в аналізі факторів та узагальненні методів, які впливають на забезпечення безпеки руху пішоходів при перетині залізничних колій в одному рівні.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Аналіз причин, які впливають на настання транспортних подій з учасниками руху (пішоходами) при перетині залізничних колій в одному рівні.

2. Узагальнення існуючих методів попередження транспортних подій на залізничних переїздах із пішоходами.

3. Формулювання поняття «Залізничного пішохідного переходу» та пропозиції розширення існуючої категорійності залізничних переїздів в Україні.

Основна частина дослідження. Ключові причини, які підкреслюють актуальність та важливість наукового дослідження, щодо підвищення стану безпеки руху пішоходів при перетині залізничних колій наведено на рис. 3.

До них належать: ризики збільшення несанкціонованих переходів через залізничну колію у невстановлених місцях; підвищення пішохідно-пасажирських потоків та збільшення кількості аварій за участі пішоходів в останні роки (рис. 1). А також відсутність сучасних інфраструктурних рішень безпечного переходу пішоходами залізничних колій в одному рівні.

На основі наведених причин, щодо актуальності забезпечення безпеки руху пішоходів при перетині залізничних колій, необхідно розробляти та впроваджувати сучасні технічні рішення для попередження транспортних подій. Враховуючи виклики сьогодення, необхідно модернізувати інфраструктуру, тобто зробити її доступною для маломобільних груп населення та людей з інвалідністю.

Наведемо інформаційно-технічні методи, які впливають на попередження транспортних подій при перетині залізничних колій (рис 4.). Такі методи повинні враховувати використання сучасних інформаційних систем світло-звукового попередження пішоходів про наближення рухомого складу, а також використання загороджувальних засобів та проведення інформаційних кампаній щодо безпечного переходу залізничних колій.

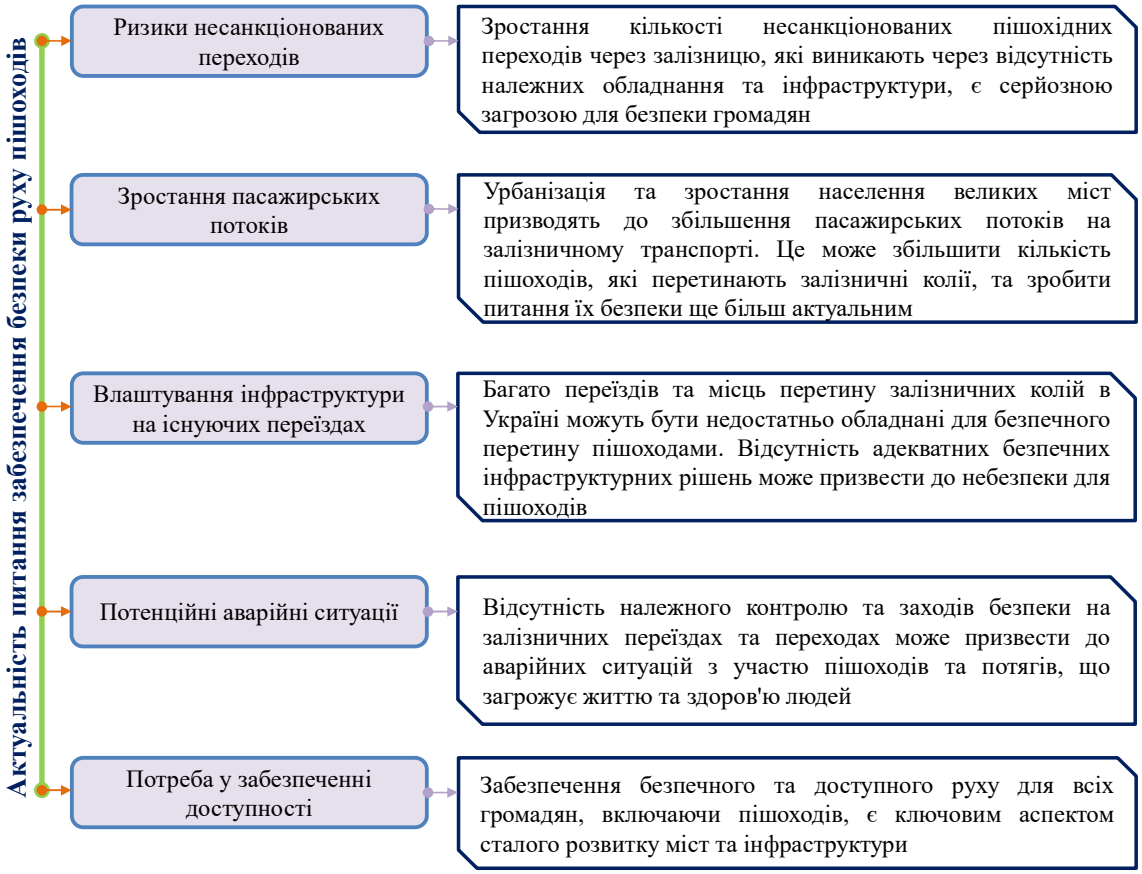


Рис. 3. Причини актуальності безпеки руху пішоходів при перетині залізничних колій в Україні

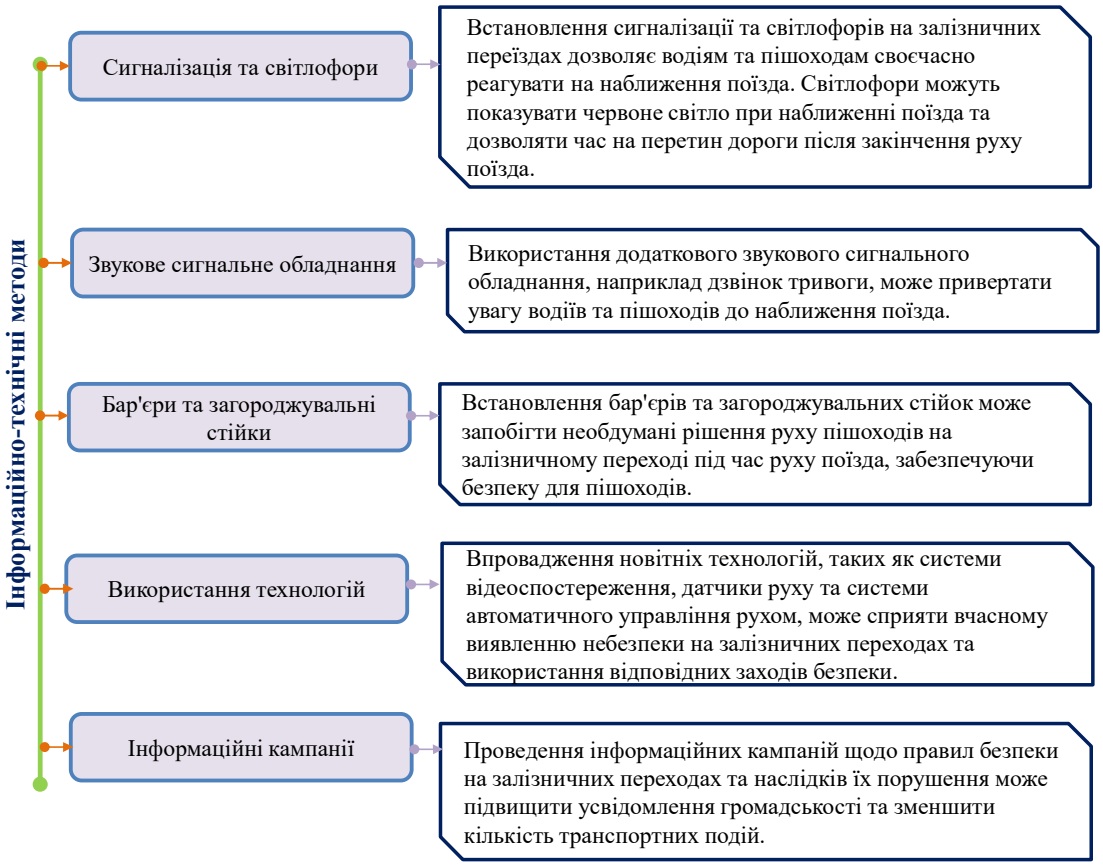


Рис. 4. Інформаційно-технічні методи

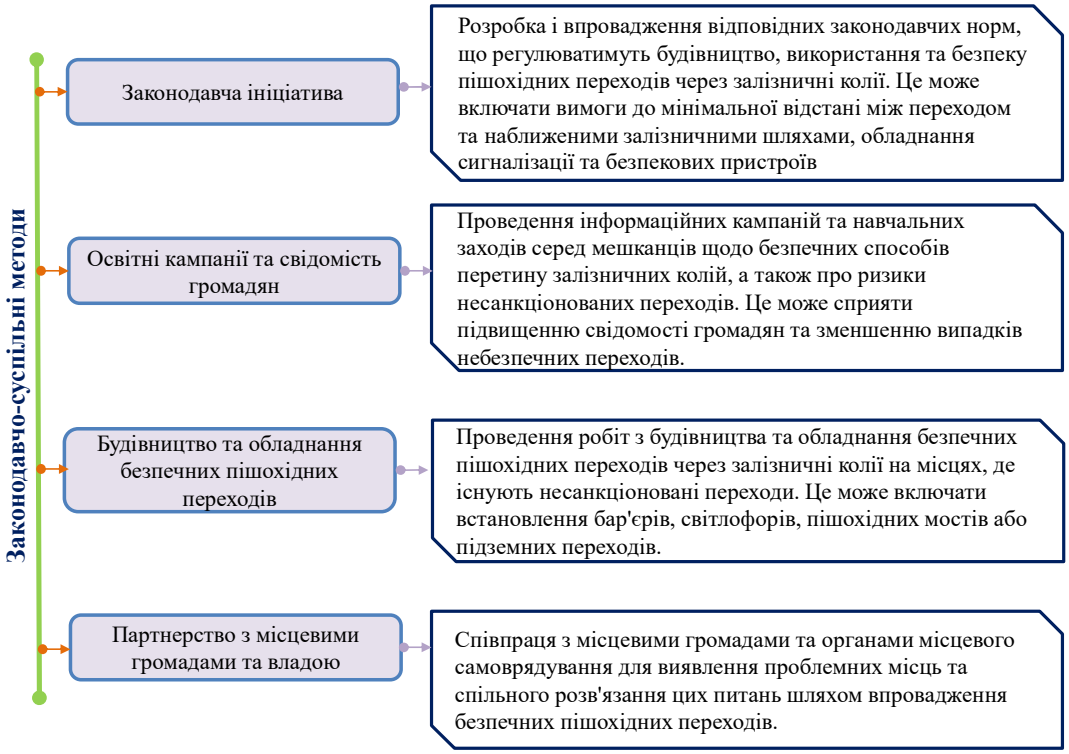


Рис. 5. Законодавчо-суспільні методи

На нашу думку ефективне забезпечення безпеки на залізничних пішохідних переходах можливе завдяки комплексному підходу, який включає як технічні засоби, так і сучасні інформаційні технології. Крім цих складових важливу роль також відіграють просвітницькі заходи, які наведені на рис. 5.

Законодавчо-суспільні методи, такі як удосконалення законодавчих норм стосовно улаштування безпечних залізничних пішохідних переходів, освітні кампанії та просвітницькі заходи за участі місцевої влади та громад, відіграють важливу роль у формуванні безпечного середовища на залізничних пішохідних переходах. Гармонізація законодавства з міжнародними стандартами та активна співпраця з громадськістю сприятимуть зниженню ризиків і покращенню культури безпеки. Однак успіх вирішення цієї проблеми буде залежати від спільних зусиль державних та місцевих органів влади, транспортних компаній та громадських організацій.

Враховуючи ці методи потрібно змінити підхід до пішоходів на залізниці та удосконалити існуючу класифікацію залізничних переїздів. Згідно ДСТУ 3587:2022 «Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги. Вимоги до експлуатаційного стану» [3] в Україні затверджено чотири категорії залізничних переїздів. В інструкції [10] зазначено, що переїзди з інтенсивністю пішохідного руху більше 100 осіб/год обладнуються пішохідними доріжками. З Європейської практики відомо, що існує окрема класифікація переїздів (категорія Е), яка відноситься до залізничних переходів для пішоходів[11] . Наприклад, в Польщі [12] категорія Е, яка враховує пішохідний рух в межах залізничного переїзду складає 4% від загальної кількості залізничних переїздів.

Загальна класифікація залізничних переїздів в Європейському Союзі наведена на рис. 6.

Враховуючи стратегію України щодо євроінтеграції, пропонуємо до існуючих чотирьох категорій в Україні [10] додати категорію Е. Така категорія передбачає рух пішоходів через залізничну колію із облаштованим пішохідним переходом та інформаційною системою попередження про наближення поїзда. Більш детально дана інформаційна система попередження наведена в праці [13]. На основі цього пропонується ввести термін «Залізничний пішохідний перехід», який являє собою перехід, який призначений для руху пішоходів через залізничні колії з дотриманням умов та правил безпеки, обладнаний спеціальним настилом, біля якого встановлені відповідні знаки та інформаційна система попередження пішохода про наближення поїзда [14].

Рис. 6. Класифікація залізничних переїздів в Європейському Союзі

Влаштування сучасних залізничних пішохідних переходів в населених пунктах дозволить підвищити стан безпеки руху пішоходів та підвищить комфорт для маломобільних груп населення та осіб з інвалідністю.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

1. Аналіз причин, які впливають на настання транспортних подій з учасниками пішохідного руху при перетині залізничних колій в одному рівні показав, що необхідно розробляти та впроваджувати сучасні технічні та інформаційні рішення попередження транспортних подій. Зокрема, модернізувати інфраструктуру, шляхом влаштування повноцінних залізничних пішохідних переходів із урахуванням потреб доступності для маломобільних груп населення та людей з інвалідністю.

2. Запровадження сучасних інформаційних, технічних і суспільних методів дозволить попередити транспортні події з участю пішоходів при перетині залізничних колій. Проведення просвітницьких заходів сприятиме підвищенню культури безпечної поведінки пішоходів.

3. Запропоновано формулювання поняття залізничного пішохідного переходу, яке дозволить в перспективі правильно трактувати та розширити існуючу категорійність залізничних переїздів в Україні. Це сприятиме гармонізацій законодавчих вимог питань залізничних переїздів з класифікацією залізничних переїздів, яка існує в Європейському Союзі.

В продовженні наукових досліджень буде удосконалення комплексної методики оцінювання коефіцієнта забезпечення безпеки руху пішоходів при перетині залізничних колій із урахування комплексу технічних, інформаційних та інших засобів.

Література

1. Звіт Державної служби України з безпеки на транспорті за 2023 р. Режим доступу: https://dsbt.gov.ua/diialnist/bezpeka-na-transporti/analiz-stanu-bezpeky-rukhu-ta-avariinosti-na-nazemnomu-transporti-v-ukraini-za-2023-rik)
2. Vitaliy Kovalchuk, Yulia Lesiv /Problems of ensuring the safety of pedestrian traffic across railway tracks and ways to solve them (Проблеми забезпечення безпеки руху пішоходів через залізничні колії та шляхи їх вирішення) // e-ISSN 2617-9059 Transport Systems and Technologies. Kyiv. 43, 2024. Pp. 8-20. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-1
3. ДСТУ 3587:2022 «Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги. Вимоги до експлуатаційного стану».
4. У Львові з'явився пішохідний перехід через колії між вул. Городоцькою та Курмановича. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://www.032.ua/news/2201898/u-lvovi-zavivsa-pisohidnij-perehid-cerez-kolii-miz-vul-gorodockou-ta-kurmanovica-foto
5. Переходи для життя. [Електронний ресурс] /Ілона Павленко// Режим доступу: https://www.ukrinform.ua/rubric-society/2592761-perehodi-dla-zitta.html
6. На Вінниччині встановили перший пішохідний перехід через залізничні колії [Електронний ресурс] / НовиниУКР.НЕТ // Режим доступу: https://today.vn.ua/na-vinnychchyni-vstanovyly-pershyj-pishohidnyj-perehid-cherez-zaliznychni-koliyi/
7. . Директива 2004/49/ЄС Європейського Парламенту і Ради «Про безпеку залізниць у Співтоваристві» від 29.04.2004 р.
8. Principles for managing level crossing safety. Office of Rail and Road (ORR). 15 June 2021. Режим доступу: https://www.orr.gov.uk/sites/default/files/2021-06/principles-for-managing-level-crossing-safety-june-2021_0.pdf
9. Track Statistics. Current Federal Railroad Administration (FRA). [Електронний ресурс] Режим доступу: https://oli.org/track-statistics
10. Інструкція з улаштування та експлуатації залізничних переїздів. ЦП 0174. Київ, 2007. 67 с.
11. Метод вибору рівня повноти безпеки для функцій управління, керування та сигналізації. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/337880355

_Method_for_Selecting_the_Safety_Integrity_Level_for_the_Control-Command_and_Signaling_Functions
12. National Safety Authority Safety Report for Year 2018; Railway Transport Authority: Warsaw, Poland, 2019;ISBN 978-83-65709-35-6.
13. Vitalii Kovalchuk, Yulia Lesiv. Devising a method for improving pedestrian traffic safety when crossing railroad tracks by implementing an information system with a fixed warning time (Розробка інформаційної системи підвищення безпеки руху пішоходів при перетині залізничних колій) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Kharkiv. 2/3 (128), 2024. Pp. 50-59. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.300168
14. Юлія Лесів, Віталій Ковальчук.. Актуальність та доцільність впровадження терміну: «Залізничний пішохідний перехід». Матеріали 16-ї Міжнародної науково-практичної конференції студентів та молодих вчених імені Г. М. Кірпи «Сучасні транспортні технології» м. Львів 21.11. 2024 р.

References

1. 1. Zvit Derzhavnoyi sluzhbi Ukrayini z bezpeki na transporti za 2023 r. Rezhim dostupu: https://dsbt.gov.ua/diialnist/bezpeka-na-transporti/analiz-stanu-bezpeky-rukhu-ta-avariinosti-na-nazemnomu-transporti-v-ukraini-za-2023-rik)
2. Vitaliy Kovalchuk, Yulia Lesiv /Problems of ensuring the safety of pedestrian traffic across railway tracks and ways to solve them // e-ISSN 2617-9059 Transport Systems and Technologies. Kyiv. 43, 2024. Pp. 8-20. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-1
3. DSTU 3587:2022 «Bezpeka dorozhnogo ruhu. Avtomobilni dorogi. Vimogi do ekspluatatsIynogo stanu».
4. U Lvovi z'yavivsya pishohidniy perehid cherez koliyi mizh vul. Gorodotskoyu ta Kurmanovicha. [Elektronniy resurs] Rezhim dostupu: https://www.032.ua/news/2201898/u-lvovi-zavivsa-pisohidnij-perehid-cerez-kolii-miz-vul-gorodockou-ta-kurmanovica-foto
5. Perehodi dlya zhittya. [Elektronniy resurs] /Ilona Pavlenko// Rezhim dostupu: https://www.ukrinform.ua/rubric-society/2592761-perehodi-dla-zitta.html
6. Na Vinnichchini vstanovili pershiy pishohidniy perehid cherez zaliznichnI koliyi [Elektronniy resurs] / NoviniUKR.NET // Rezhim dostupu: https://today.vn.ua/na-vinnychchyni-vstanovyly-pershyj-pishohidnyj-perehid-cherez-zaliznychni-koliyi/
7. Direktiva 2004/49/ES Evropeyskogo Parlamentu I Radi «Pro bezpeku zaliznits u Spivtovaristvi» vid 29.04.2004 r.
8. Principles for managing level crossing safety. Office of Rail and Road (ORR). 15 June 2021. Режим доступу: https://www.orr.gov.uk/sites/default/files/2021-06/principles-for-managing-level-crossing-safety-june-2021_0.pdf
9. Track Statistics. Current Federal Railroad Administration (FRA). [Електронний ресурс] Режим доступу: https://oli.org/track-statistics
10. InstruktsIya z ulashtuvannya ta ekspluatatsiyi zalIznichnih pereYizdIv. TsP 0174. Kiyiv, 2007.67 s.
11. Metod viboru rivnya povnoti bezpeki dlya funktsIy upravlInnya, keruvannya ta signalizatsiyi. [Elektronniy resurs] Rezhim dostupu: https://www.researchgate.net/publication/337880355_Method_for_Selecting_the_Safety_Integrity_Level_for_the_Control-Command_and_Signaling_Functions
12. National Safety Authority Safety Report for Year 2018; Railway Transport Authority: Warsaw, Poland, 2019;ISBN 978-83-65709-35-6.
13. Vitalii Kovalchuk, Yulia Lesiv. Devising a method for improving pedestrian traffic safety when crossing railroad tracks by implementing an information system with a fixed warning time // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Kharkiv. 2/3 (128), 2024. Pp. 50-59. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.300168
14. Yuliya Lesiv, Vitaliy Kovalchuk.. Aktualnist ta dotsilnost vprovadzhennya terminu: «Zaliznichniy pishohidniy perehid». Materiali 16-Yi Mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi studentiv ta molodih vchenih Imeni G. M. Kirpi «Suchasni transportni tehnologiyi» m. LvIv 21.11. 2024 r.

Lesiv Yu.Z., Kovalchuk V.V. Relevance of provision and methods of improving pedestrian traffic safety at railway crossing

The conducted analysis of the dynamics of accidents in railway transport involving unauthorized individuals due to collisions with rolling stock indicates a steady annual increase. This trend is associated with the growth of pedestrian flows in urbanized cities, where railways disrupt pedestrian routes, often leading to violations of safe railway crossing rules. Therefore, the issue of ensuring pedestrian safety when crossing railway tracks remains highly relevant and timely.

The aim of this article is to analyze key factors and generalize methods that contribute to ensuring pedestrian safety when crossing railway tracks at the same level. The study identifies and examines the main causes and contributing factors of traffic incidents involving pedestrians at railway crossings. It has been determined that the primary causes of increased pedestrian accidents within railway zones are unauthorized crossings and the absence of sufficient warning systems to prevent such incidents.

The study further analyzes contemporary methods aimed at improving pedestrian safety at railway crossings. These methods include the installation of specialized pedestrian crossings equipped with informational, visual, and barrier systems that warn pedestrians of approaching

rolling stock. Additionally, it has been found that pedestrian safety is significantly influenced by legislative and societal factors, particularly in the context of creating a safe railway environment.

Based on an in-depth analysis of global experience and best practices for enhancing railway safety, the study proposes the introduction of the term "Railway Pedestrian Crossing" along with its definition. Furthermore, recommendations are provided for expanding the classification of railway crossings in Ukraine to include a dedicated category for pedestrian crossings.

The article also presents proposals for improving the infrastructure of railway pedestrian crossings by integrating intelligent warning and control systems to enhance safety. Additionally, perspectives for future research in the field of railway crossing safety are outlined, particularly focusing on the implementation of automated systems for monitoring and managing pedestrian flows at railway crossings.

The findings highlight the importance of a comprehensive approach to railway safety, emphasizing the integration of advanced technologies, regulatory measures, and public awareness campaigns. Given the increasing urbanization and expansion of transport networks, these initiatives will contribute to reducing pedestrian-related railway incidents and ensuring the creation of a safe and efficient railway transport environment.

***Keywords**: traffic safety, railway pedestrian crossings, transport incidents, accident prevention, information warning systems, crossing classification.*

Лесів Юлія Зіновіївна – аспірантка, асистент кафедри «Транспортні технології», Інститут механічної інженерії та транспорту, Національного університету «Львівська політехніка», yuliia.z.lesiv@lpnu.ua

Ковальчук Віталій Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Залізничний транспорт», Інститут механічної інженерії та транспорту, Національного університету «Львівська політехніка», vitalii.v.kovalchuk@lpnu.ua

Стаття подана 12.02.2025.

Наукове видання

ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 1 (287) 2025

Науковий журнал

Відповідальний за випуск	Лорія М.Г.
Оригінал-макет	Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 15.03.2025 р.
Формат 60 х 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 10,7. Обл.-вид. арк. 12,5.
Наклад 50 прим. Вид. № 3412. Замов. № __.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

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

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