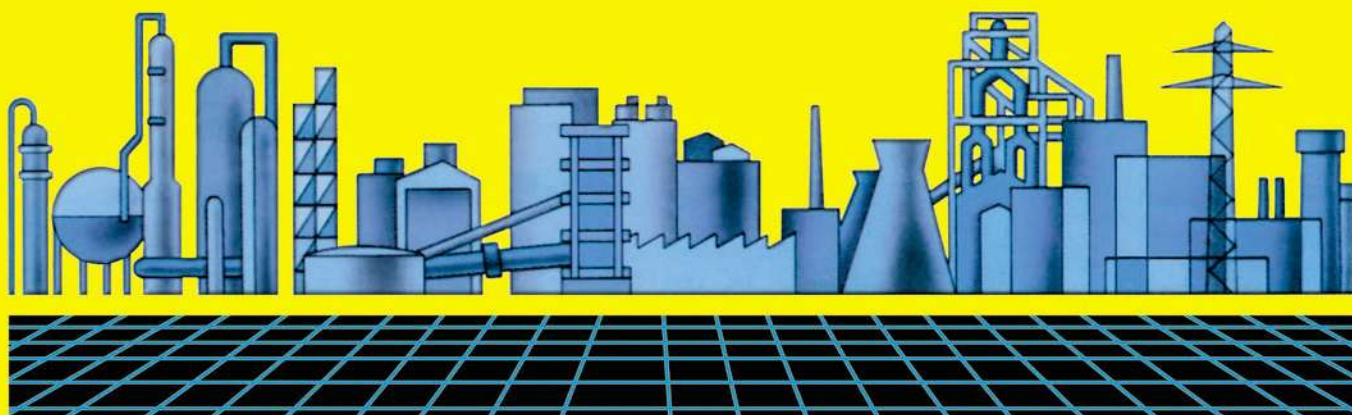


ІТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЩОКВАРТАЛЬНИЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ



ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

3'2025

Видання засновано Харківським державним політехнічним університетом у 1998 році
(від листопада 2000 р. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

Держвидання
Свідчення Міністерства інформації України
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.
Свідчення перереєстровано у Міністерстві юстиції України
КВ № 24313-ПР від 06.02.2020 р.
Ідентифікатор медіа R30-02564, згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 11.01.2024 №33

Журнал включений
до переліку наукових фахових видань України
(Наказ Міністерства освіти та науки України №886 від 02.07.2020)
Категорія журналу «Б»

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Л. Л. Товажнянський, член-кор. НАН України
Технічний редактор
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц., зав. каф. ІТПА НТУ "ХПІ"

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

О. П. Арсеньєва, д-р техн. наук, професор, професор каф. АКІТ ХНУМІ ім. О. М. Бекетова
В. Є. Вель, д-р техн. наук, професор, професор каф. ІТПА НТУ "ХПІ"
П. О. Некрасов, д-р техн. наук, професор, проф. каф. ТЖПБ НТУ "ХПІ"
П. О. Качанов, д-р техн. наук, професор, зав. каф. АУТС НТУ "ХПІ"
М. П. Кудненко, д-р техн. наук, професор, зав. каф. Теплотехніки та енергоефективних технологій НТУ "ХПІ"
В. В. Стариков, д-р техн. наук, доцент, зав. каф. Технічної кріофізики НТУ "ХПІ"
Г. Л. Хавін, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПІ"
А. М. Ганжа, д-р техн. наук, професор, професор каф. ТЕТ НТУ "ХПІ"
О. Б. Аніпко, д-р техн. наук, професор каф. інженерно-авіаційного забезпечення, Харківський національний університет Повітряних сил ім. І. Кожедуба
В. А. Маляренко, д-р техн. наук, професор, професор каф. СЕЕМ ХНУМІ
В. В. Лебедєв, д-р техн. наук, доцент, доцент каф. ТПМ і БАП НТУ "ХПІ"
П. О. Капустенко, канд. техн. наук, професор, акад. Академії будівництва України
Ференс Фридлер, PhD, professor, Pázmány Péter Katolikus egyetem, Budapest, Hungary
Шарифа Рафидан Ван Алви, PhD, professor, Mалайзійський університет технологій
Девид Дж. Куккулька, PhD, професор, Державний університет Нью-Йоркського коледжу у Буффало, США
Євген Кеніг, д-р техн. наук, професор, Падерборнський університет, Німеччина
Мартін Пікон-Нуньєс, PhD, professor, Університет Гуанахуато, Мексика
Петар Варбанов, старший науковий співробітник NETME Center - SPIL, Технологічний університет Брно, Чеська республіка
Майкл Уолмслі, BE, PhD ChemEng, Університет Вайкато, Окленд, Нова Зеландія
П. Стехлік, PhD, проф., Директор Технологічного університету Брно (Чеська республіка)
Панос Сеферліс, PhD, проф., університет Арістотеля в Салоніках, Греція

Журнал включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі до бібліографічної бази даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://ite.khpi.edu.ua>

EDITORIAL BOARD

The editor-in-chief

L. L. Tovazhnyanskyi, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, NTU "KhPI"

Technical editor

K. O. Gorbunov, PhD, Assistant Professor, professor NTU "KhPI"

THE MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

O. P. Arsenyeva, Doctor of Technical Sciences, Prof., O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
V. E. Ved, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
P. O. Nekrasov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
P. O. Kachanov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
M. P. Kundenko, Doctor of Technical sciences, Prof., Head of Heat engineering and energy efficient technologies department NTU "KhPI"
V. V. Starikov, Doctor of Technical sciences, Assistant Professor, Head of Technical Cryophysics Department NTU "KhPI"
G. L. Khavin, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
A. M. Hanzha, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
O. B. Anipko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kozhedub Kharkiv Air Force University
V. A. Malyarenko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kharkov National University of Municipal Economy named after O. M. Beketova
V. V. Lebediev, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, NTU "KhPI"
P. O. Kapustenko, PhD, professor NTU "KhPI"
Ferenc Friedler, PhD, professor, Pázmány Péter Catholic University, Budapest, Hungary
Sharifah Rafidah Wan Alwi, PhD, professor, Universiti Teknologi Malaysia
David J. Kukulka, PhD, professor, State University of New York College at Buffalo, USA
Eugeniy Kenig, prof., dr.-ing., Paderborn University, Germany
Martin Picón Núñez, PhD, professor, university of Guanajuato, Mexico
Petar Sabevarbanov, Senior Researcher, NETME Centre - SPIL, BRNO University of Technology, Czech Republic
Michael Walmsley, BE, PhD ChemEng, University of Waikato, New Zealand
Petr Stehlik, PhD, professor, Director of Institute Brno University of Technology, Czech Republic
Panos Seferlis, PhD, professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:
61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2
Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

<i>Дубовкіна І. О., Мирончук А. О.</i> Використання методу дискретно-імпульсного введення енергії для підвищення продуктивності у гідропонних технологіях.....	3
<i>Ведь В. Є., Ведь О. В., Широков С.</i> Дослідження властивостей первинних носіїв каталізаторів конверсії СО	13
<i>Кануннікова Н. О., Босюк А. С., Сакун А. О., Матющенко О. В., Шестопалов О. В.</i> Підвищення надійності енергетичного обладнання АЕС засобами поверхневої інженерії в умовах екологічних викликів.....	26
<i>Дешко В. І., Білоус І. Ю., Суходуб І. О., Гетманчук Г. О., Крамаренко С. О., Гавриш А. В.</i> Аналіз змін сонячних теплонадходжень і вітрових характеристик у регіонах України з фокусом на екстремальні кліматичні умови.....	36
<i>Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Рябова І. Б., Нагорний Е. Р., Пільник І. В., Рись В. Г.</i> Вимірювання та надійність виробництва ексергії в енергетичній установці.....	50

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

<i>Товажнянський Л. Л., Миронов А. М., Ільченко М. В., Козуля М. М., Горбунов В. К.</i> Штучний інтелект як інструмент хімічної інженерії: аналіз, моделювання, числові методи, оптимізація, інтеграція.....	66
<i>Товажнянський Л. Л., Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Миронов А. М., Ільченко М. В., Пономаренко Г. В.</i> Моделювання та прогнозування екологічної безпеки довкілля у міському природокористуванні.....	80
<i>Аніпко О. Б., Тюріна В. Ю., Панкул О. М.</i> Методи прогнозування раціональних строків початку проведення профілактичних робіт при зміні інтенсивності експлуатації повітряних суден.....	92

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<i>Близнюк О. М., Пуятін Б. В., Станкевич С. В., Свіщова Я. О., Масалітіна Н. Ю., Белінська А. П.</i> Оптимізація складу емульсійних систем на основі біополімерів для запобігання окисному псуванню бета-каротину.....	100
<i>Борисенко М. О., Сінкевич І. В.</i> Полімерний віск як основа для виробництва шліфувально-полірувальних паст.....	109
<i>Гаїпов А. Я., Григоров А. Б.</i> Технологія виробництва на базі вторинної сировини ізоляційних вуглеводневих матеріалів для захисту нафто- та газопроводів.....	119
<i>Кочетов М. С., Тихомирова Т. С.</i> Використання кавової гущі у складі очищуючих засобів як елемент сталого управління відходами.....	132
<i>Шкоп А. О., Пономарьова Н. Г., Шестопалов О. В., Босюк А. С., Войтенко Д. М., Бутко В. С.</i> Розробка технології переробки післяспиртової барди зовнішніх бардонакопичувачів у паливні пелети.....	142

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

<i>Пурис В. В., Лебедєв В. В.</i> Сучасні підходи до підвищення експлуатаційних характеристик агломератів з відходів поліамідів.....	160
---	-----

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 8 від 08.07.2025 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження : щоквартальний науково-практичний журнал / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. – № 3. – 169 с.

Журнал наукових та науково-практичних статей з питань енергозбереження та сучасних технологій різноманітних галузей промисловості.

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2025

І. О. Дубовкіна, д-р техн. наук, старший наук. співроб., А. О. Мирончук, аспірантка

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ У ГІДРОПОННИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ, Україна

Ключові слова: гідродинаміка, дискретно-імпульсне введення енергії, роторно-пульсаційний апарат, напруження зсуву потоку, продуктивність.

Пошук нових енергоефективних технологій та способів є актуальним, враховуючи енергетичні витрати у переробній промисловості. На сьогоднішній день у світі зростає інтерес до гідропонних технологій вирощування як альтернативи до традиційного землеробства, що дозволяє культивувати рослини в умовах обмежених природних ресурсів, зокрема води та родючих ґрунтів. Впровадження гідропонних систем залежить насамперед від якості та стабільності живильного середовища, яке дає змогу забезпечувати рослини комплексом необхідних макро- і мікроелементів. При цьому традиційні методи одержання живильних середовищ, а саме гідропонних розчинів не завжди забезпечують рівномірний розподіл компонентів, достатню біологічну активність середовища та оптимальні фізико-хімічні параметри.

У сучасних дослідженнях доведено, що фізичні методи впливу на рідинні гетерогенні системи можуть змінювати їх фізико-хімічні характеристики та сприяти інтенсифікації масообміну. Зокрема, метод дискретно-імпульсного введення енергії поєднує низку гідродинамічних ефектів (напруження зсуву потоку, швидкості зсуву потоку, зміна тиску, пульсації потоку), які можуть бути використані для одержання живильних розчинів. Проте на сьогодні недостатньо досліджено вплив такого методу на агробіологічні показники рослин під час застосування гідропонних технологій, що зумовлює потребу у проведенні додаткових наукових досліджень.

Таким чином, актуальною науково-технічною проблемою є розроблення та експериментальна перевірка застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії під час одержання живильних розчинів, який би сприяв підвищенню продуктивності рослин, покращенню їх морфометричних характеристик та формуванню сприятливого мікробного середовища при вирощуванні у гідропонних системах.

З огляду на зростання актуальності проблеми раціонального вирощування рослин у гідропонних системах, науковці дедалі більше уваги приділяють удосконаленню складу живильних середовищ, впровадженню автоматизованих технологій контролю агротехнічних параметрів та розробці енергоощадних методів обробки робочого середовища. У цьому напрямі вже здійснено низку фундаментальних досліджень як в Україні, так і за кордоном.

Так, у праці Кумара В. та співавторів наголошено на світовій тенденції поширення гідропоніки як інструмента реагування на наслідки зміни клімату, дефіцит водних ресурсів і зменшення площ родючих ґрунтів. Автори відзначають необхідність створення доступних та економічно вигідних автоматизованих систем, здатних працювати з мінімальним залученням людини [7, с. 291].

У статті Реджесера Г. проаналізовані можливості інтеграції смарт-технологій – сенсорних мереж, систем штучного інтелекту та автоматизованого керування – у практику гідропонного виробництва. Такий підхід дозволяє значно підвищити точність моніторингу параметрів живильних розчинів і водночас знизити втрати води та добрив [8, с. 925].

Особливої уваги заслуговують дослідження Хашізуме Т. та Такакі К., яких розглядається дія імпульсних електричних полів і часомодульованої плазми на ріст рослин та мікробіологічні процеси. Отримані результати дають підстави стверджувати, що фізичні методи впливу, серед яких і знакозмінні імпульси тиску, можуть відігравати значну роль у підвищенні ефективності гідропонних технологій [6, с. 59].

У дослідженні Ванг С. та Рагвана В. показано, що біологічна модифікація живильного середовища шляхом додавання компосту, збагаченого бактеріями *Bacillus safensis*, позитивно впливає на розвиток салату та сприяє формуванню збалансованої мікробіоти [11].

Соціально-економічний вимір гідропонних технологій розглянуто у роботі Рамоса М., де автор аналізує бар'єри впровадження цифрових гідропонних систем у міських агропроєктах і підкреслює необхідність адаптації таких технологій до специфіки локальних спільнот [9].

Попри широкий спектр існуючих досліджень щодо оптимізації гідропонних систем, залишається низка невирішених питань. Зокрема, недостатньо вивченими залишаються фізичні методи впливу на живильні розчини, здатні змінювати їхні фізико-хімічні параметри на мікро- та нанорівнях; обмежено досліджені гідродинамічні ефекти у гідропоніці, включаючи дію знакозмінних імпульсів тиску; бракує інформації щодо мікробіологічної стабільності середовищ після фізичного оброблення; не вистачає експериментів, які поєднували б енергофізичний вплив із біологічними результатами для рослин у контрольованих умовах.

Таким чином, проведені дослідження частково усуває наявні прогалини у науковій літературі, запропонувавши новий метод підвищення ефективності гідропонного вирощування на основі застосування знакозмінних імпульсів тиску. Цей підхід формує підґрунтя для подальших міждисциплінарних досліджень на перетині агрофізики, мікробіології та систем автоматизації.

Метою статті є оцінка ефективності застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії в гідропонних умовах та вплив одержаного живильного розчину на зростання та продуктивність рослин. Завдання наукової роботи полягає у проведенні експериментальних досліджень з одержання живильних розчинів із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) та дослідження впливу оброблених розчинів на зростання та врожайність обраних культур.

Методика дослідження ґрунтувалася на використанні роторно-пульсаційного апарата (РПА), в якому реалізовані гідродинамічні ефекти ДІВЕ в рідкому середовищі, а саме: напруження зсуву потоку, швидкості зсуву потоку, зміна тиску, пульсації потоку, що сприяють інтенсифікації тепломасообміну й масоперенесенню.

Об'єктами дослідження стали сільськогосподарські рослини: тритикале сорту Амфіплоїд 44, Амфіплоїд 51, АДМ 9. Вибір цих культур обумовлений їхнім широким застосуванням у сільському господарстві та чутливістю до умов живильного середовища. Для експериментальних досліджень були використані три типи розчинів: бідистильована вода, вода для крапельного зрошення та мінералізований живильний розчин.

Для одержання живильних розчинів використовувались наступні параметри, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Гідродинамічні ефекти методу дискретно-імпульсного введення енергії, реалізовані в роторно-пульсаційному апараті

№ п/п	Технічний параметр	Значення
1	Час оброблення, с	10–600
2	Частота пульсацій потоку, Гц	1–5
3	Кутова швидкість, с^{-1}	300–315
4	Напруження зсуву потоку, 10^3Па	250–390
5	Швидкість зсуву потоку, 10^5с^{-1}	2,7–3,5

Після оброблення підготовлені живильні середовища подавалися у створений для фітотестування лабораторний гідропонний стенд. Умови вирощування підтримувалися стабільними: температура 21–24 °С, освітленість 900–1100 лк/м². Тривалість експериментальних серій з фітотестування становила 10–14 днів, що дозволяло провести оцінювання початкових фаз росту і розвитку рослин.

Отримані дані дали змогу комплексно оцінити ефективність застосування методу ДІВЕ при вирощуванні сільськогосподарських культур та виявити їх потенціал для інтенсифікації гідропонних технологій у рослинництві.

Для мікробіологічного аналізу використовувався метод оптичної мікроскопії (Carl Zeiss Axio Imager Vario II, збільшення $\times 640$), а саме для визначення видового складу і чисельності мікроорганізмів до і після вирощування. Обробку даних здійснювали у Microsoft Excel 2010 з розрахунком середніх значень і стандартного відхилення, що дозволило встановити статистичну достовірність результатів [10, с. 171].

Експериментальні дослідження проводилися на дослідній установці, зображений на рис. 1 [4, с. 45].

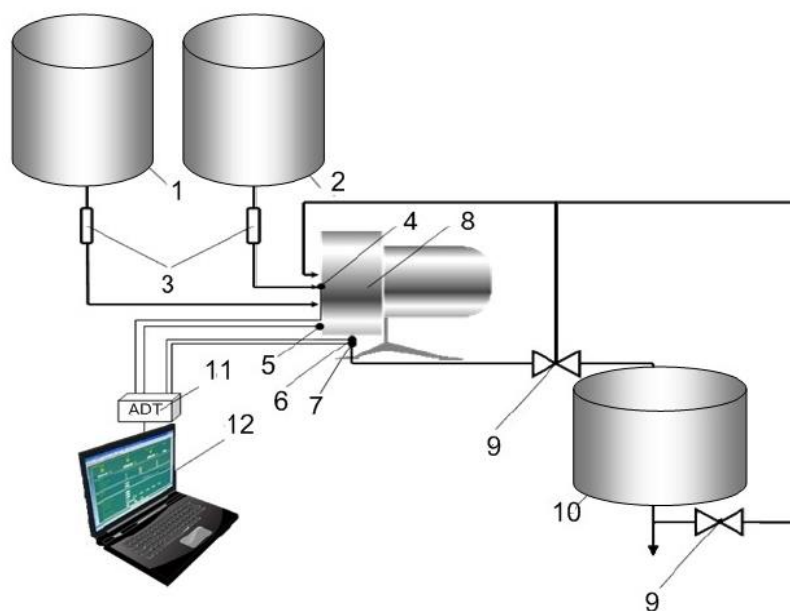


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки: 1 – бак для рідини; 2 – бак для поживних речовин; 3 – вентиль; 4, 6 – датчики температури; 5, 7 – датчики тиску; 8 – роторно-пульсаційний апарат; 9 – вентиль; 10 – бак для обробленого розчину; 11 – аналогово-цифровий перетворювач; 12 – персональний комп'ютер

В основі експериментальної установки було обрано роторно-пульсаційний апарат (8), в якому здійснювалось гідродинамічне оброблення живильного розчину за рахунок напруження зсуву потоку, швидкості зсуву потоку, зміни тиску, пульсацій потоку.

Початковий розчин (вода чи інше середовище) подається у бак 1, тоді як поживні компоненти надходять у бак 2. Через витратоміри 3 складові потрапляють у робочу камеру роторно-пульсаційного апарата 8, де здійснюється їх миттєве змішування під впливом знакозмінних імпульсів тиску. Оброблення можливе у двох режимах: безперервний режим – одноразове проходження суміші через камеру та рециркуляційний режим – багаторазове оброблення середовища для інтенсивнішої дії.

Після оброблення розчин спрямовується у бак 10 через вентиль 9. У процесі експерименту здійснювався контроль температури (датчики 4 і 6), тиску (датчики 5 і 7) та інших параметрів, що реєструвалися за допомогою аналогово-цифрового перетворювача 11 і передавалися на ПК 12 [2, с. 35].

Отримані результати підтвердили відчутний вплив знакозмінних імпульсів тиску на морфометричні й декоративні характеристики тритикале сортів Амфіплоїд 44, Амфіплоїд 51, АДМ9, вирощуваних у гідропонній системі. У середньому було зафіксовано збільшення висоти рослин на 18–22 %, підвищення інтенсивності біомасоутворення на 31–34 %, приріст маси надземної частини на 33–36 % та зростання коефіцієнта росту на 20–22 % відносно контрольних варіантів (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив живильних розчинів, одержаних із застосуванням методу ДІВЕ на біомасоутворення сільськогосподарських рослин

Культура	Параметр	Контроль (середнє $\pm$ SD)	Обробка імпульсами (середнє $\pm$ SD)	Зміна, %
Амфіплоїд 44	Висота рослин, см	15,7 $\pm$ 0,3	18,6 $\pm$ 0,4	+18,5
	Продуктивність, кг/м ²	13,2 $\pm$ 0,4	17,6 $\pm$ 0,5	+33,3
	Маса, кг	26,4 $\pm$ 0,6	35,2 $\pm$ 0,8	+33,3
	Коефіцієнт росту	4,3 $\pm$ 0,2	5,2 $\pm$ 0,2	+20,9
Амфіплоїд 51	Висота рослин, см	16,0 $\pm$ 0,3	18,9 $\pm$ 0,4	+18,1
	Продуктивність, кг/м ²	13,5 $\pm$ 0,5	18,0 $\pm$ 0,6	+33,3
	Маса, кг	40,0 $\pm$ 0,7	53,7 $\pm$ 1,0	+34,3
	Коефіцієнт росту	4,4 $\pm$ 0,2	5,3 $\pm$ 0,2	+20,5
АДМ9	Висота рослин, см	16,2 $\pm$ 0,3	19,0 $\pm$ 0,4	+17,3
	Продуктивність, кг/м ²	13,6 $\pm$ 0,5	18,1 $\pm$ 0,6	+33,1
	Маса, кг	40,3 $\pm$ 0,8	54,1 $\pm$ 1,0	+34,2
	Коефіцієнт росту	4,5 $\pm$ 0,2	5,4 $\pm$ 0,2	+20,0

Примітки: значення представлені як середнє $\pm$ стандартне відхилення ($n=3$); відсоток зміни розрахований відносно контрольного значення.

Отримані результати свідчать, що застосування живильних розчинів, одержаних методом ДІВЕ сприяють підвищенню продуктивності та позитивно позначаються на морфологічних характеристиках досліджуваних рослин (рис. 2).

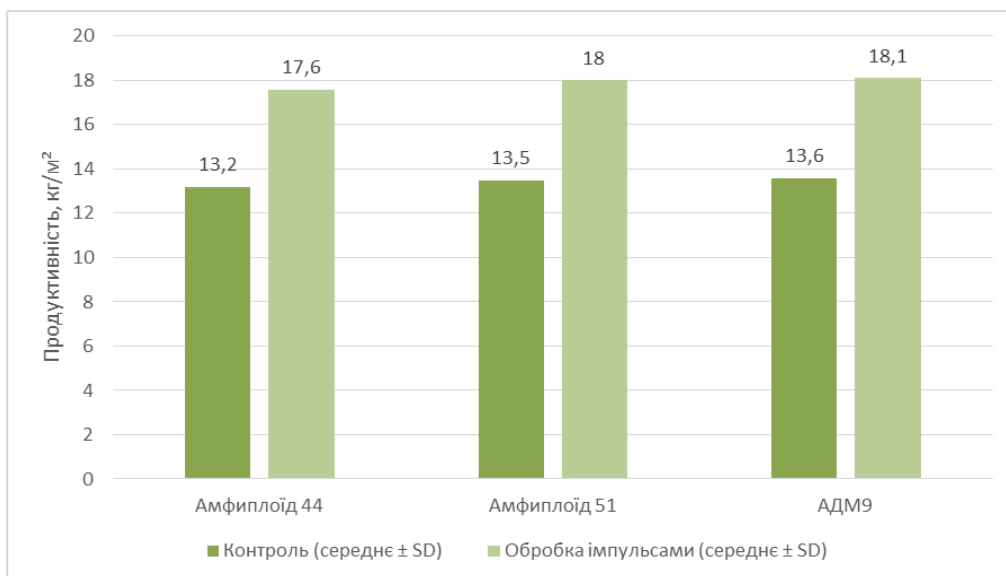


Рисунок 2 – Вплив методу ДІВЕ на продуктивність сільськогосподарських культур у гідропонній системі

Проведений мікробіологічний аналіз підтвердив формування корисної мікрофлори у живильних розчинах після їх оброблення. Серед виявлених домінуючих мікроорганізмів зафіксовано *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Amoeba proteus* та *Euglena gracilis*. Наявність цих видів свідчить про стабільність та біологічну збалансованість середовища (табл. 3).

Таблиця 3 – Біологічний склад живильних розчинів до та після культивування рослин

Поживний розчин	До вирощування	Після вирощування
Дистильована вода	Мікроорганізми відсутні	<i>Chlorella vulgaris</i> (після вирощування Амфиплоїд 44), <i>Amoeba proteus</i> (після вирощування Амфиплоїд 51), <i>Nostoc spp.</i> (після вирощування АДМ9)
Вода для зрошення	Поодинокі мікроорганізми	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> , <i>Euglena gracilis</i>
Розчин із добривами	Наявні мікроорганізми	<i>Cyanobacteria</i> (<i>Anabaena spp.</i> , <i>Nostoc spp.</i>)

Отже, застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії сприяє інтенсифікації процесів засвоєння поживних речовин, що, у свою чергу, забезпечує підвищення врожайності на 32,8–34 %. Запропонований метод дає змогу модифікувати фізико-хімічні властивості живильних розчинів на мікро- та нанорівнях, що позитивно впливає на ріст і розвиток рослин. Біологічний аналіз підтверджує формування стабільної мікрофлори в розчинах, що відкриває перспективи їх повторного використання в умовах гідропонного вирощування [5, с. 344].

Було встановлено, що застосування методу ДІВЕ можна розглядати як перспективний для аграрного та харчового виробництва, оскільки він сприяє зростанню продуктивності культур при одночасному ощадливому використанні ресурсів.

На початкових етапах гідропонного вирощування сільськогосподарських культур мінеральне живлення кореневої системи не використовувалося. Відомо, що протягом перших 7–12 днів рослина функціонує за рахунок власних запасів: поживні речовини, що містяться у тканинах, забезпечують розвиток зародка та початкових пагонів. У цей час живлення має комбінований характер: спершу переважає гетеротрофний тип, а згодом, завдяки активації фотосинтезу, формується автотрофний механізм [1, с. 981].

Результативність одержання живильних розчинів за допомогою методу ДІВЕ залежить від технічних параметрів під час оброблення та одержання. В результаті проведення серії експериментальних досліджень було встановлено, що оптимальними є: тривалість впливу 15–30 с, частота пульсацій потоку 1–5 Гц, напруження зсуву потоку, $370\text{--}390 \cdot 10^3 \text{ Па}$, кутова швидкість $300\text{--}315 \text{ с}^{-1}$, швидкість зсуву потоку $3,2\text{--}3,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Отримані експериментальні дані підтвердили, що використання такого режиму стимулює морфогенетичні процеси у сільськогосподарських культур, сприяє посиленню ростових функцій і суттєво покращує їхні морфометричні показники.

Узагальнені результати, які відображають вплив методу ДІВЕ на динаміку росту та врожайність Амфіплоїд 44, Амфіплоїд 51, АДМ9 в умовах гідропоніки (зокрема висоту рослин, продуктивність, середню масу надземної частини й коефіцієнт росту), наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Вплив живильних розчинів, одержаних із застосуванням методу ДІВЕ на вирощування сільськогосподарських культур, одержаних гідропонним способом

Культура	Параметр	Контроль (середнє $\pm$ SD)	Обробка імпульсами (середнє $\pm$ SD)	Зміна, %
Амфіплоїд 44	Висота рослин, см	$15,8 \pm 0,3$	$18,6 \pm 0,4$	+17,7
	Продуктивність, кг/м ²	$13,3 \pm 0,5$	$17,7 \pm 0,6$	+33,1
	Маса, кг	$26,5 \pm 0,7$	$35,3 \pm 0,8$	+33,2
	Коефіцієнт росту	$4,3 \pm 0,2$	$5,2 \pm 0,2$	+20,9
Амфіплоїд 51	Висота рослин, см	$16,0 \pm 0,3$	$18,9 \pm 0,4$	+18,1
	Продуктивність, кг/м ²	$13,4 \pm 0,5$	$18,0 \pm 0,6$	+34,3
	Маса, кг	$40,0 \pm 0,8$	$53,8 \pm 1,0$	+34,5
	Коефіцієнт росту	$4,4 \pm 0,2$	$5,3 \pm 0,2$	+20,5
АДМ9	Висота рослин, см	$16,2 \pm 0,3$	$19,0 \pm 0,4$	+17,3
	Продуктивність, кг/м ²	$13,6 \pm 0,5$	$18,2 \pm 0,6$	+33,8
	Маса, кг	$40,2 \pm 0,8$	$54,0 \pm 1,0$	+34,3
	Коефіцієнт росту	$4,5 \pm 0,2$	$5,4 \pm 0,2$	+20,0

Аналіз отриманих результатів експерименту показав, що використання знакомінних імпульсів тиску при обробленні живильних розчинів у гідропонних установках значно підвищує продуктивність рослин. Зокрема, врожайність Амфіплоїду 44 збільшилася на 33,1 %, Амфіплоїду 51 – на 34,3 %, а АДМ9 – на 33,8 % відносно контрольних зразків. Додатково зафіксовано зростання біомаси в середньому на 20–22 % залежно від виду рослини. Найбільше підвищення врожайності спостерігалось при використанні мінералізованого живильного розчину, тоді як найбільш інтенсивний приріст морфометричних показників був характерний для варіанту з водою, підготовленою для

систем крапельного зрошення, що відповідає агрономічним та екологічним вимогам до її якості.

Доведено, що вплив методу ДІВЕ викликає структурні перетворення на мікро- і нанорівнях, у результаті чого змінюються фізико-хімічні характеристики середовища, що стимулює масопереносні та гідродинамічні процеси між водою та поживними елементами, покращує їх доступність для рослин і прискорює їх розвиток. Отже, технологія підтвердила свою ефективність для рослин, оскільки забезпечує не лише зростання зеленої біомаси, а й покращення їхніх морфологічних характеристик.

В результаті проведених експериментальних досліджень підтверджено позитивний вплив використання живильних середовищ, одержаних із застосуванням методу ДІВЕ на морфометричні характеристики та біологічну продуктивність сільськогосподарських культур – Амфіплоїд 44, Амфіплоїд 51, АДМ9. Оброблення живильних розчинів у роторно-пульсаційному апараті сприяло зростанню висоти рослин, маси надземної частини, коефіцієнта росту та приросту зеленої біомаси. Порівняно з контрольними варіантами, приріст зеленої маси становив 33,1 % для Амфіплоїду 44, 34,3 % для Амфіплоїду 51 та 33,8 % для АДМ9. Одержані дані свідчать про ефективність використання гідродинамічного впливу для інтенсифікації процесів живлення та розвитку сільськогосподарських рослин у гідропонних системах.

Отримані результати доводять, що застосування методу ДІВЕ для одержання живильних розчинів є доцільним не лише з точки зору підвищення біомасоутворення, але й для покращення морфометричних властивостей рослин – інтенсивності забарвлення та рівномірності росту, що вказує на перспективність технології для широкого впровадження у практику промислового й експериментального рослинництва.

Наведені дані можуть стати підґрунтям для подальших міждисциплінарних досліджень із залученням інженерних, мікробіологічних та агрохімічних підходів. Особливої уваги потребує визначення оптимальних параметрів оброблення для різних видів культур, а також розробка автоматизованих систем контролю процесу у масштабах промислових гідропонних комплексів.

Подальші дослідження варто спрямувати на уточнення параметрів гідродинамічного оброблення шляхом застосування методу ДІВЕ – для різних груп рослин, а також на оцінку економічної доцільності впровадження технології в умовах промислового землеробства.

Література

1. Abinandan S., Subashchandrabose S. R., Venkateswarlu K. Soil microalgae and cyanobacteria: the biotechnological potential in the maintenance of soil fertility and health. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2019. Vol. 39, iss. 8. P. 981–998. DOI: 10.1080/07388551.2019.1654972.
2. Acevedo E., Silva P., Silva H. Wheat growth and physiology. *Plant Production and Protection*. 2002. No. 30. P. 35–36.
3. Dubovkina I. Innovative technology of water treatment in recirculating aquaculture-hydroponic system. *Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності* : матеріали VI Міжнар. спеціалізованої наук.-практ. конф., 12 вересня 2017 р., м. Київ. Київ : НУХТ, 2017. С. 43–44.
4. Dubovkina I. Change of physical and chemical parameters of the liquid binary systems by alternating impulses of pressure. *Ukrainian Food Journal*. 2017. Vol. 6, iss. 1. P. 142–154. DOI: 10.24263/2304-974X-2017-6-1-16.

5. Dubovkina I., Davydenko B., Rikhter V. Modelling of the hydrodynamic conditions throughout liquid system treatment by alternating impulses of pressure. *Ukrainian Food Journal*. 2019. Vol. 8, iss. 2. P. 343–354. DOI: 10.24263/2304-974X-2019-8-2-13.
6. Takaki K., Takahashi K., Hayashi N. et al. Pulsed power applications for agriculture and food processing. *Reviews of Modern Plasma Physics*. 2021. Vol. 5, article number 12. P. 59. DOI: 10.1007/s41614-021-00059-9.
7. Kumar R., Rathore S., Kundlas K., Rattan S. Vertical farming and organic farming integration: a review. *Organic Farming: Global Perspectives and Methods (Woodhead Publishing Series in Food Science)*. 2023. P. 291–315. DOI: 10.1016/B978-0-323-99145-2.00002-1.
8. Kumar A., Singh J. Trends in hydroponics practice/technology in horticultural crops: a review. *International Journal of Plant & Soil Science*. 2023. Vol. 35, iss. 2. P. 57–65. DOI: 10.9734/ijpss/2023/v35i22759.
9. Rajaseger G., Chan K. L., Tan K. Y., Ramasamy S., Khin M. C. Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*. 2023. Vol. 19, iss. 9. P. 925–938. DOI: 10.6026/97320630019925.
10. Ramos M. Innovations in hydroponic systems for urban agriculture. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*. 2002. Vol. 7, iss. 1. DOI: 10.1002/uar2.20012.
11. Шурчкова Ю. О. Дослідження параметрів водно-спиртових сумішей отриманих в умовах знакозмінних імпульсів тиску. Ю. О. Шурчкова, І. О. Дубовкіна. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ"* : зб. наук. пр. Харків : НТУ "ХПІ". 2015. № 36 (1145) : Механіко-технологічні системи та комплекси : темат. вип. С. 97–100.
12. Wang S., Raghavan V. Hydroponic farming – a state of art for the future agriculture. *Journal of Cleaner Production*. 2022. No. 366. P. 132855. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132855.

Bibliography (transliterated)

1. Abinandan S., Subashchandrabose S. R., Venkateswarlu K. Soil microalgae and cyanobacteria: the biotechnological potential in the maintenance of soil fertility and health. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2019. Vol. 39, iss. 8. P. 981–998. DOI: 10.1080/07388551.2019.1654972.
2. Acevedo E., Silva P., Silva H. Wheat growth and physiology. *Plant Production and Protection*. 2002. No. 30. P. 35–36.
3. Dubovkina I. Innovative technology of water treatment in recirculating aquaculture-hydroponic system. *Resurso- ta enerhooshchadni tekhnolohii vyrobnytstva i pakuvannia kharchovoi produktsii – osnovni zasady yii konkurentozdatnosti* : materialy VI Mizhnarodnoi spetsializovanoi nauk.-prakt. kon., 12 veresnia 2017 r., m. Kyiv. Kyiv : NUKhT, 2017. P. 43–44.
4. Dubovkina I. Change of physical and chemical parameters of the liquid binary systems by alternating impulses of pressure. *Ukrainian Food Journal*. 2017. Vol. 6, iss. 1. P. 142–154. DOI: 10.24263/2304-974X-2017-6-1-16.
5. Dubovkina I., Davydenko B., Rikhter V. Modelling of the hydrodynamic conditions throughout liquid system treatment by alternating impulses of pressure. *Ukrainian Food Journal*. 2019. Vol. 8, iss. 2. P. 343–354. DOI: 10.24263/2304-974X-2019-8-2-13.
6. Takaki K., Takahashi K., Hayashi N. et al. Pulsed power applications for agriculture and food processing. *Reviews of Modern Plasma Physics*. 2021. Vol. 5, article number 12. P. 59. DOI: 10.1007/s41614-021-00059-9.

7. Kumar R., Rathore S., Kundlas K., Rattan S. Vertical farming and organic farming integration: a review. *Organic Farming: Global Perspectives and Methods (Woodhead Publishing Series in Food Science)*. 2023. P. 291–315. DOI: 10.1016/B978-0-323-99145-2.00002-1.
8. Kumar A., Singh J. Trends in hydroponics practice/technology in horticultural crops: a review. *International Journal of Plant & Soil Science*. 2023. Vol. 35, iss. 2. P. 57–65. DOI: 10.9734/ijpss/2023/v35i22759.
9. Rajaseger G., Chan K. L., Tan K. Y., Ramasamy S., Khin M. C. Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*. 2023. Vol. 19, iss. 9. P. 925–938. DOI: 10.6026/97320630019925.
10. Ramos M. Innovations in hydroponic systems for urban agriculture. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*. 2002. Vol. 7, iss. 1. DOI: 10.1002/uar2.20012.
11. Shurchkova Yu. O. Doslidzhennia parametriv vodno-spyrtovykh sumishei otrymanykh v umovakh znakovminnykh impulsiv tysku. Yu. O. Shurchkova, I. O. Dubovkina. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI"* : zb. nauk. pr. Kharkiv : NTU "KhPI". 2015. № 36 (1145) : Mekhaniko-tekhnologichni systemy ta komplekсы : temat. vyp. P. 97–100.
12. Wang S., Raghavan V. Hydroponic farming – a state of art for the future agriculture. *Journal of Cleaner Production*. 2022. No. 366. P. 132855. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132855.

УДК 536.423

І. О. Дубовкіна, д-р техн. наук, старший наук. співроб., А. О. Мирончук, аспірантка

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ У ГІДРОПОННИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

У статті розглянуто застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) для інтенсифікації гідропонних технологій. Актуальність дослідження зумовлена зростаючим інтересом до гідропоніки як альтернативи традиційному землеробству в умовах обмежених природних ресурсів. Відзначено, що традиційні методи підготовки живильних середовищ не завжди забезпечують рівномірний розподіл компонентів, біологічну стабільність та оптимальні фізико-хімічні параметри. У цьому контексті використання фізичних методів впливу, зокрема знакозмінних імпульсів тиску, відкриває нові можливості для підвищення продуктивності рослин.

Метою дослідження стала оцінка ефективності застосування ДІВЕ у гідропонних умовах та вплив одержаних живильних розчинів на ріст і врожайність культур. Методика ґрунтувалася на використанні роторно-пульсаційного апарата, що забезпечує дію напружень і швидкостей зсуву потоку, зміну тиску та пульсації середовища. Об'єктами дослідження були сорти тритикале (Амфіплоїд 44, Амфіплоїд 51, АДМ9), для яких проводили фітотестування в лабораторних умовах із різними типами розчинів.

Отримані результати підтвердили позитивний вплив оброблення розчинів методом ДІВЕ: висота рослин зросла в середньому на 18–22 %, інтенсивність біомасоутворення – на 31–34%, маса надземної частини – на 33–36%, а коефіцієнт росту – на 20–22 % порівняно з контролем. Крім того, було зафіксовано формування корисної мікрофлори (*Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Euglena gracilis* тощо), що свідчить про біологічну збалансованість живильного середовища після оброблення. Опти-

мальними параметрами визнано тривалість дії 15–30 с, частоту пульсацій 1–5 Гц та напруження зсуву $370\text{--}390 \cdot 10^3$ Па.

Таким чином, застосування ДІВЕ є ефективним для інтенсифікації гідропонного вирощування сільськогосподарських культур. Технологія забезпечує підвищення врожайності на 32,8–34 %, покращує морфометричні характеристики та створює стабільне мікробне середовище, що вказує на перспективність методу для впровадження у промислових масштабах, а також відкриває напрями подальших міждисциплінарних досліджень з оптимізації параметрів гідродинамічного оброблення й економічної доцільності використання у сучасному рослинництві.

Ключові слова: гідродинаміка, дискретно-імпульсне введення енергії, роторно-пульсаційний апарат, напруження зсуву потоку, продуктивність.

I. O. Dubovkina, A. O. Myronchuk

APPLICATION OF THE DISCRETE-IMPULSE ENERGY INPUT METHOD TO INCREASE PRODUCTIVITY IN HYDROPONIC TECHNOLOGIES

The article examines the application of the method of discrete-impulse energy input (DIEI) for the intensification of hydroponic technologies. The relevance of the study is driven by the growing interest in hydroponics as an alternative to traditional agriculture under conditions of limited natural resources. It is noted that conventional methods of preparing nutrient solutions do not always ensure uniform distribution of components, biological stability, and optimal physicochemical parameters. In this context, the use of physical methods of influence, particularly alternating pressure pulses, opens up new opportunities for increasing plant productivity.

The aim of the study was to evaluate the effectiveness of DIEI under hydroponic conditions and to assess the impact of the obtained nutrient solutions on plant growth and yield. The methodology was based on the use of a rotor-pulsation apparatus, which provides the effects of flow shear stresses and rates, pressure variations, and flow pulsations. The objects of the study were triticale varieties (Amphiploid 44, Amphiploid 51, ADM9), which were tested in laboratory hydroponic conditions using different types of solutions.

The results confirmed the positive effect of DIEI-treated solutions: plant height increased on average by 18–22 %, biomass formation intensity by 31–34 %, aboveground mass by 33–36 %, and growth coefficient by 20–22 % compared to the control. In addition, the formation of beneficial microflora (*Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Euglena gracilis*, etc.) was observed, indicating the biological balance of the nutrient medium after treatment. The optimal parameters were determined as a treatment duration of 15–30 seconds, flow pulsation frequency of 1–5 Hz, and shear stress of $370\text{--}390 \cdot 10^3$ Pa.

Thus, the application of DIEI is effective for intensifying hydroponic cultivation of agricultural crops. The technology increases yields by 32.8–34 %, improves morphometric characteristics, and creates a stable microbial environment, which indicates the potential of the method for industrial-scale implementation. It also opens avenues for further interdisciplinary research aimed at optimizing hydrodynamic treatment parameters and evaluating the economic feasibility of its use in modern crop production.

Keywords: hydroponics, alternating pressure pulses, rotor-pulsation apparatus, ornamental crops, iris, boxwood, hydrangea, microflora, productivity.

В. Є. Ведь, д-р техн. наук, професор, О. В. Ведь, канд. техн. наук, доцент,
С. Широков, аспірант

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЕРВИННИХ НОСІЇВ КАТАЛІЗАТОРІВ КОНВЕРСІЇ СО

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: носії каталізаторів, конверсія оксиду вуглецю, каталітична активність, енергія активації, корунд, муллітокремнезем, кордієрит.

Оксид вуглецю СО або чадний газ – токсичний продукт неповного згоряння вуглеводневого палива, що становить значну небезпеку як для здоров'я людини, так і для навколишнього середовища. Джерела надходження оксиду вуглецю в атмосферу – газові викиди двигунів транспортних засобів, викиди металургійних та хімічних підприємств, у складі яких СО часто становить значну частку забруднюючих речовин. Ефективне зниження концентрації СО у газових викидах можливе за рахунок примусового проходження відпрацьованих газових потоків через об'єми каталітичних нейтралізаторів, у яких відбувається окиснення чадного газу до вуглекислого газу CO_2 , що не є токсичною сполукою.

На рис. 1 наведено принципову схему каталітичного нейтралізатора (проточного типу, осове розташування каналів) двигуна внутрішнього згоряння.

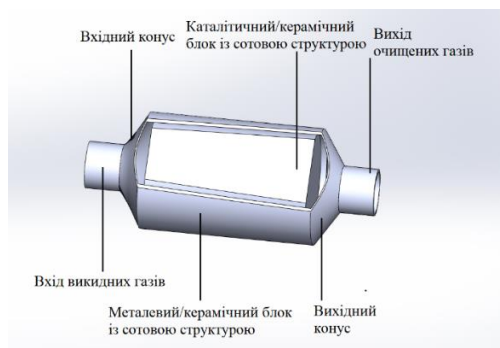


Рисунок 1 – Принципова схема каталітичного нейтралізатора

Опис складових елементів каталітичного нейтралізатора. Корпус нейтралізатора – герметичний, жаростійкий, виготовлений з нержавіючої сталі, витримує високі температури та тиск. Вхідний та вихідний конуси забезпечують плавну зміну діаметра прохідного перерізу для рівномірного розподілу потоку газу. Сотовий носій, первинний (моноліт) – керамічний (на основі корунду або кордієриту) або металевий (з фольги). Соти розташовані вздовж осі нейтралізатора, у напрямку потоку газу, створені з розвинутою площею поверхні для нанесення каталізатора. На поверхню каналів – сот може наноситися вторинний носій. Каталітичне покриття може містити метали платинової групи (Pt, Pd, Rh) та інші. Сотовий носій відокремлений від корпусу нейтралізатора тепловою ізоляцією (волокниста кераміка) з метою термостабілізації робочого органу нейтралізатора та захисту його від механічних зовнішніх впливів.

Конверсія CO є основною реакцією в автомобільних нейтралізаторах викидних газів двигунів внутрішнього згорання з іскровим запалюванням, установках фільтрації повітря, паливних елементах, а також у системах очищення промислових відпрацьованих газових потоків. Вона протікає за реакцією:



Вибір носія каталізатора має вирішальний вплив на активність, конструкцію, стабільність і вартість нейтралізатора. Оптимальний носій забезпечує ефективний розподіл активного компонента, покращені взаємодії метал–носій (SMSI)*, збільшену площу інтерфейсу**, а також високу термостійкість.

Загальні вимоги до носіїв: висока питома поверхня, термічна та механічна стійкість, хімічна інертність або можливість поверхневої модифікації, стабільність при циклах нагріву – охолодження (термостійкість).

У таблиці 1 наведено порівняння властивостей основних відомих носіїв каталізаторів для окиснення CO у CO₂.

CeO₂ виділяється на тлі інших носіїв за рахунок активної участі в реакціях з участю кисню через здатність його «зберігати» та брати участь у його передачі, що є критично важливим для стабільної роботи каталізатора. Роль CeO₂ у каталізі перетворення CO в CO₂ полягає в його кисневій буферній здатності (Oxygen Storage Capacity***, OSC): CeO₂ здатний накопичувати та віддавати кисень завдяки переходу між станами Ce⁴⁺ ↔ Ce³⁺. Це є вирішальним у реакціях окиснення, наприклад:



Особливо важлива присутність цього оксиду в процесах CO-окиснення за змінних умов, як у робочому двигуні. Температура початку ефективного очищення становить 200–250 °C. CeO₂ разом з іншим оксидом (наприклад, Al₂O₃) може бути основним вихідним компонентом, з якого шляхом спікання виготовляють первинний носій. CeO₂ також виконує роль вторинного носія, якщо його нанести на поверхню первинного. У такому випадку він слугує модифікатором, який покращує властивості основного носія і навіть бере участь у самій реакції як активний компонент каталізатора, особливо в реакціях окиснення CO [2–8].

Однак досить висока вартість вихідного матеріалу та обов'язкове використання дорогих легуючих елементів на основі рідкоземельних металів у синтезі кераміки на базі CeO₂ обмежують застосування цього матеріалу.

TiO₂ у формі рутилу стійкий до агресивних середовищ і високих температур. В автомобільній промисловості його використовують як носій каталізаторів типу SCR****.

Для довідки:

* SMSI (Strong Metal-Support Interaction) – явище сильної взаємодії між металевими наночастинками (каталітичним металом) та поверхнею носія (зазвичай оксиду металу).

** Інтерфейс "метал–носій" – це зона, де відбуваються ключові взаємодії, які впливають на каталітичну активність. Чим більша площа інтерфейсу, тим вища щільність активних центрів, що беруть участь у реакціях.

*** Oxygen Storage Capacity (OSC) – здатність матеріалу (часто каталізатора або носія каталізатора) зворотньо зберігати та віддавати кисень. Ця властивість є критично важливою для реакцій, які потребують коливань рівня кисню, наприклад, у процесах у автомобільних системах контролю викидів. OSC визначається кількістю кисню, який може бути обміняний з навколишнім середовищем при змінних умовах.

**** SCR (Selective Catalytic Reduction, селективне каталітичне відновлення) – технологія очищення вихлопних газів дизельних двигунів та промислових установок від оксидів азоту (NO_x).

TiO_2 як носій не виявляє реакційної активності, як наприклад V_2O_5 , CuO_x та ін., але виконує важливу роль як модифікатор. Його задача – тримати активні компоненти, забезпечувати доступ газу до них та впливати на їх стабільність і активність [9–13].

У роботі [14] показано, що ZrO_2 перевершує TiO_2 як носій для Ru-каталізаторів завдяки структурній стабільності при багаторазових циклах. Цей оксид застосовується при синтезі метанолу, сухому риформінгу метану та в ін. технологіях [15–16].

Таблиця 1 – Основні властивості носіїв каталізаторів окиснення CO в CO_2 [1]

Носій	Питома поверхня	Термостійкість	Киснева рухливість / участь у реакції кисню	Застосування
$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	Висока (100–300 m^2/g)	До $\sim 1000^\circ\text{C}$	Низька	Покриття активних фаз, автокаталізатори
CeO_2	Середня (30–100 m^2/g)	До $\sim 800^\circ\text{C}$	Висока ($\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$)	TWC*, очищення від CO, NO_x
TiO_2	Середня	$\sim 700^\circ\text{C}$	Середня	Фотокаталіз, очищення повітря
ZrO_2	Середня	Дуже висока	Середня	Високотемпературні системи
Цеоліти	Дуже висока ($>300 \text{ m}^2/\text{g}$)	Середня	Середня	Низькотемпературне окиснення CO
SiO_2	Низька – середня	Висока	Низька	Інертний носій, термостійкі каталізатори
Муллітокремнезем	Низька	Дуже висока	Низька	Стаціонарні промислові каталізатори
Кордієрит	Дуже низька	Дуже висока	Низька	Монолітні автокаталізатори (з покриттям Al_2O_3)

Для довідки:

* TWC – Three-Way Catalyst (трифункціональний каталізатор). Це тип автомобільного каталізатора, що використовується в системах нейтралізації вихлопних газів дизельних двигунів внутрішнього згоряння, який одночасно виконує три ключові функції: окиснення CO до CO_2 , окиснення неперетворених вуглеводнів до CO_2 та H_2O , відновлення оксидів азоту до N_2 .

Даних про дослідження щодо використання ZrO_2 як основного носія каталізаторів двигунів внутрішнього згоряння нами не виявлено.

Глибокі теоретичні дослідження [17–18] виділяють оксид алюмінію як найбільш широко застосовувану сполуку для виготовлення носіїв каталізаторів. У табл. 1 наведені дані про властивості найбільш реакційної низькотемпературної форми $\gamma-Al_2O_3$, яка використовується як покриття активних фаз, так і як автокаталізatori. Однак досвід робіт у галузі високотемпературної кераміки показує [19], що $\gamma-Al_2O_3$ схильний до процесу спікання навіть за температур, значно нижчих за $1000\text{ }^\circ\text{C}$, що може призводити до деформації носіїв і втрати їх функціонального призначення.

Високотемпературна форма оксиду алюмінію – корунд – $\alpha-Al_2O_3$ утворюється або спіканням промислового Al_2O_3 з легуючими добавками за температур $1640\text{--}1780\text{ }^\circ\text{C}$, або плавленням глинозему – $Al(OH)_3$ або промислового Al_2O_3 у електродугових печах [20].

Виробництво отримання корунду є досить витратним і яке додатково включає в себе вартість енергоємних процесів подрібнення особливо міцних продуктів синтезу. Тим не менш вироби на основі корунду, отримані вторинним спіканням підготовлених сумішей подрібненого $\alpha-Al_2O_3$ виявляють найвищі показники властивостей, що дозволяє їх використовувати в якості носіїв каталізаторів сучасних апаратів для газових нейтралізаторів: промислових, технічних установок і двигунів внутрішнього згоряння. Істотний недолік виробів на основі корунду – невисока здатність протистояти ударним навантаженням.

Наночастинки Ag на SiO_2 демонструють повну конверсію CO вже при $\sim 125\text{ }^\circ\text{C}$ зі стійкістю протягом 100 год. Pt, нанесена на SiO_2 починає ефективно окислювати CO вже при $\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ (ефективність майже 100 % при $100\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$) [21–23].

Найпоширеніший тип для синтезу носіїв на основі SiO_2 – його аморфна модифікація (осаджений, пірогенний, гель). Він утворюється гідролізом тетраетоксисилану золь-гель методом [24]. Як кремнеземних носіїв застосовують аморфний SiO_2 та кварцове скло в експериментальних або лабораторних дослідженнях [25].

Наведені роботи констатують, що застосування скла (наприклад, боросилікатне або кварцове скло), що утворюється плавкою піску (SiO_2), соди (Na_2CO_3), вапняку ($CaCO_3$) або борних сполук у каталізі обмежено: скло інертне, але не пористе і не застосовується як високоефективний пористий носій навіть володіючи високою термостійкістю.

Цеоліти як вторинні носії каталізаторів знаходять широке застосування в різних технологіях, де платина і кобальт, нанесені на цеоліт, призводять до повного видалення CO у водневомісній суміші при $50\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$. Процес забезпечує високу селективність, що особливо актуально для паливних елементів. Нещодавнє дослідження на платинових цеолітних носіях (Si/Al і структура каналів) демонструє, що можна керувати активністю у реакції окиснення CO через підбір складу та морфології підтримки [26].

Нещодавні роботи показують, що купрум-цеоліти одночасно ефективно видаляють NO_x та CO, а одиночні іони Cu^{2+} та Cu_xO_x грають ключову роль у реакційній активності [27–29].

Застосування цеолітів у автомобільних каталізаторах: для селективного відновлення оксидів азоту (NO_x -SCR) за допомогою відновника (зазвичай NH_3).



Для холодного старту двигунів (Cold-start catalysts): при запуску двигуна очисна система повинна бути робочою при температурах ($<200\text{ }^{\circ}\text{C}$);

Цеоліти з іонами Cu, Ag або Pd сприяють ефективному окисненню CO та HC, наприклад присутність іонів Cu дозволяє зберегти активність каталізатора при температурах нижче $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, а Pt використовується для попередньої очистки всього об'єму каталітичного нейтралізатора перед холодним запуском двигуна. Цеоліти використовуються як NO_x адсорбенти у передпусковому режимі двигуна, а при роботі двигуна відбувається регенерація ($\text{NO} \rightarrow \text{N}_2$).

Важливу роль цеоліти виконують як складові фільтрів твердих частинок (DPF/SCR-on-filter*) – у сучасних дизелях цеолітні SCR-каталізатори наносять прямо на сажевий фільтр (SCR on filter або SCRF**) [30–32].

Для довідки:

* DPF/SCR-on-filter – це комбінована система, що використовується в дизельних двигунах для зниження викидів шкідливих речовин. DPF (Diesel Particulate Filter) – сажевий фільтр, який уловлює частинки сажі. SCR (Selective Catalytic Reduction) – система селективної каталітичної нейтралізації, яка знижує викиди оксидів азоту (NO_x).

**SCRF (Selective Catalytic Reduction Filter / Фільтр-нейтралізатор СКН) – це досконаліша технологія, яка поєднує функції СКН та сажевого фільтра (DPF). SCRF не лише знижує викиди NO_x , але й затримує сажу та частинки, що містяться у вихлопних газах.

Наведене дозволяє зробити висновок, що цеоліти є не просто носіями, а виконують роль активних компонентів у автомобільних каталізаторах. Завдяки унікальній структурі вони забезпечують: низькотемпературну активність (при холодному запуску), високу термостабільність (при русі на шосе), стійкість до отруєння (сіркою, вуглецем), широкий спектр застосування в автомобільних каталізаторах: від SCR до TWC та DPF.

Цеоліти використовують як вторинні носії каталізаторів. Товщина покриття – кілька десятків мікрон.

Дослідження, спрямовані на використання термостійкої кераміки на основі муллітокремнезему в каталізаторах випускної системи газів двигунів внутрішнього згоряння, є дуже нечисленними [33], що свідчить про дуже малу перспективність застосування цієї сполуки.

Кордієрит є ключовим матеріалом у сучасній «автомобільній» екології: забезпечує термостабільність носіїв каталізаторів за рахунок низького ТКЛР (температурний коефіцієнт лінійного розширення), що визначається своєю структурою та фазовим складом ($2\text{MgO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$); використовується в honeycomb-монолітах для TWC та DPF, слугує основою для washcoat систем [34].

Основні напрямки застосування кордієриту: субстрат для каталізаторів трикомпонентної системи (TWC) – це кордієритові моноліти («honeycomb») з тонкими ($\sim 30\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$) стінками, які створюють структуровану підкладку для нанесення каталітично активних елементів (Pt/Pd/Rh на вторинному носії $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{CeO}_2$), забезпечуючи ефективність перетворення NO_x , CO та HC до 99 % на нових двигунах і $\sim 95\text{ }\%$ після 6500 км пробігу. Перероблений кордієрит можна застосовувати як сировину для 3D-друку нових каталізаторів зі складною архітектурою каналів та покращеною площею поверхні [35].

Наведений аналіз властивостей основних сполук, які в різній мірі використовувалися як носії каталізаторів конверсії чадного газу, дозволив провести їх ранжування за придатністю використання у розробці відповідних конструкцій. Однак викликав деяке нерозуміння, факт відсутності в літературних джерелах параметрів, які могли б ха-

рактизувати реакційну активність наведених у табл. 1 сполук щодо основного процесу функціонування каталізатора конверсії CO.

У цьому зв'язку нами були обрані для досліджень склади можливих носіїв на основі корунду, кордієриту та муллітокремнезему.

Експериментальне визначення каталітичних властивостей первинних носіїв проводилося на установці [36]

Плавлений корунд, який був використаний у дослідженнях, містив 99,98 % Al_2O_3 . Хімічні склади кордієриту та муллітокремнезему наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Хімічний склад (у масових %) кордієриту (перша колонка) та муллітокремнезему (друга колонка)

Компонент	Склад, %	
SiO_2	47,5	62,5
Al_2O_3	35,5	33,5
MgO	15	-
Fe_2O_3	≤ 1	≤ 1
TiO_2	≤ 1	-
CaO , Na_2O , K_2O (домішки)	≤ 1	≤ 1

Для досліджень властивостей обраних складів носіїв були підготовлені зразки квазікубічної форми у такій кількості, щоб вони заповнювали робочий об'єм експериментального реактора в 1 см^3 (рис. 2).



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд згрупованих для поміщення в реактор проведення досліджень зразків носіїв каталізаторів одного складу

Виробляли визначення зміни ступеня перетворення оксиду вуглецю залежно від температури для кожного носія (рис. 3).

Як впливає з рис. 3, корунд показує найвищу каталітичну активність: різке зростання конверсії серед інших випробуваних починається при температурі близько $300\text{--}350^\circ\text{C}$, досягаючи $\sim 0,4\%$ при $\sim 500^\circ\text{C}$. Кордієрит демонструє помірну активність: плавне зростання від температур $250\text{--}300^\circ\text{C}$, досягаючи максимуму $\sim 0,24\%$. Муллітокремнезем починає ініціювати реакцію окиснення CO при вищих температурах $\sim 300^\circ\text{C}$ і є слабким активатором процесу; максимально досягнутий у експерименті ступінь перетворення становить лише $\sim 0,08\%$.

Нами були розраховані енергії активації реакцій проведення процесів окиснення чадного газу при використанні трьох розглянутих носіїв. Енергії активації реакції кон-

версії CO, розраховані по рівнянню Арреніуса [37], становлять 28,28 кДж/моль для муллітокремнезему, для кордієриту – 37,4 кДж/моль і 36,86 кДж/моль для корунду.

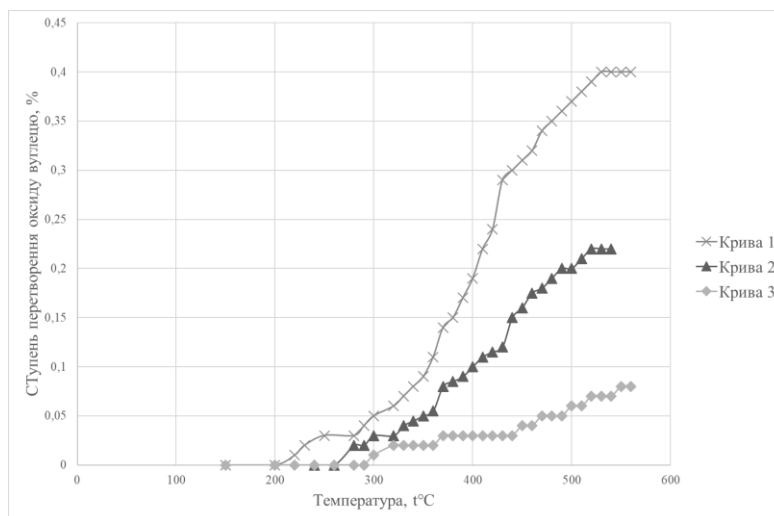


Рисунок 3 – Зміна ступеня перетворення оксиду вуглецю, % залежно від температури, °C для носіїв на основі корунду (крива 1), кордієриту (крива 2) та муллітокремнезему (крива 3)

Порівняння даних, наведених на рис. 3, з розрахованими величинами енергій активації реакцій, проведених на різних носіях, показало відсутність прямої кореляції між значеннями енергій активації та каталітичною активністю. Муллітокремнезем, незважаючи на найменшу енергію активації, виявляє найнижчу каталітичну активність. Найактивнішим серед випробуваних виявився корунд, що може бути пов'язане з його термічною стабільністю, розвиненою поверхнею та високою кількістю поверхневих активних центрів.

Тим не менш отримані результати дозволяють укласти наступне. Енергія активації не є єдиним критерієм оцінки каталітичної активності в гетерогенному каталізі.

Каталітична активність визначається комплексом факторів:

- морфологією та площею поверхні;
- кількістю та природою активних центрів;
- здатністю до адсорбції CO та O₂;
- наявністю кисневих вакансій або дефектів кристалічної ґратки.

Це підкреслює необхідність комплексного підходу до оцінки матеріалів для застосування в гетерогенному каталізі, що включає як кінетичні, так і структурно-хімічні характеристики.

Література

- Comotti M., et al. Support effect in high activity gold catalysts for CO oxidation. *Journal of the American Chemical Society*. 2006. Vol. 128, No. 3. P. 917–924. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja0561441>.
- Trovarelli A. Catalytic properties of ceria and CeO₂-containing materials. *Catalysis Reviews*. 1996. Vol. 38, No. 4. P. 439–520. DOI: <https://doi.org/10.1080/01614949608006464>.

3. Montini T., et al. Fundamentals and catalytic applications of CeO₂-based materials. *Chemical Reviews*. 2016. Vol. 116, No. 10. P. 5987–6041. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00603>.
4. Sun C., Li H., Chen L. Nanostructured ceria-based materials: synthesis, properties, and applications. *Energy & Environmental Science*. 2012. Vol. 5, No. 9. P. 8475. DOI: <https://doi.org/10.1039/c2ee22310d>.
5. Bozo C., Guilhaume N., Herrmann J.-M. Role of the ceria–zirconia support in the reactivity of platinum and palladium catalysts for methane total oxidation under lean conditions. *Journal of Catalysis*. 2001. Vol. 203, No. 2. P. 393–406. DOI: <https://doi.org/10.1006/jcat.2001.3320>.
6. Fujiwara A., et al. Thermal deactivation of ZrO₂ Pd/CeO₂ three-way catalysts during real engine aging: analysis by a surface plus peripheral site model. *ACS Omega*. 2020. Vol. 5, No. 44. P. 28897–28906. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04644>.
7. Putla S. B., et al. Review of Shape-Controlled CeO₂ Nanocatalysts for Purification of Auto-Exhaust Pollutants. *ACS Applied Nano Materials*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c00228>.
8. Kim Y., Lee H., Kwak J. H. Mechanism of CO oxidation on Pd/CeO₂ (100): the unique surface-structure of CeO₂ (100) and the role of peroxide. *ChemCatChem*. 2020. Vol. 12, No. 20. P. 5164–5172. DOI: <https://doi.org/10.1002/cctc.202000714>.
9. Busca G., et al. Chemical and mechanistic aspects of the selective catalytic reduction of NO by ammonia over oxide catalysts: a review. *Applied Catalysis B: Environmental*. 1998. Vol. 18, No. 1–2. P. 1–36. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0926-3373\(98\)00040-x](https://doi.org/10.1016/s0926-3373(98)00040-x).
10. Li J., et al. Low-temperature selective catalytic reduction of NO_x with NH₃ over metal oxide and zeolite catalysts – A review. *Catalysis Today*. 2011. Vol. 175, No. 1. P. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2011.03.034>.
11. Granger P., Parvulescu V. I. Catalytic NO_x-abatement systems for mobile sources: from three-way to lean burn after-treatment technologies. *Chemical Reviews*. 2011. Vol. 111, No. 5. P. 3155–3207. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr100168g>.
12. Christensen S. R., et al. Selective catalytic reduction of NO_x over V₂O₅-WO₃-TiO₂ SCR catalysts – a study at elevated pressure for maritime pre-turbine SCR configuration. *Emission Control Science and Technology*. 2019. Vol. 5, No. 3. P. 263–278. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40825-019-00127-0>.
13. Ye B., et al. Recent trends in vanadium-based SCR catalysts for NO_x reduction in industrial applications: stationary sources. *Nano Convergence*. 2022. Vol. 9, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40580-022-00341-7>.
14. Ftouni J., et al. ZrO₂ is preferred over TiO₂ as support for the Ru-catalyzed hydrogenation of levulinic acid to γ-valerolactone. *ACS Catalysis*. 2016. Vol. 6, No. 8. P. 5462–5472. DOI: <https://doi.org/10.1021/acscatal.6b00730>.
15. Coşkuner Filiz B., et al. Highly selective hydrogenation of levulinic acid to γ-valerolactone over Ru/ZrO₂ catalysts. *Catalysis Letters*. 2017. Vol. 147, No. 7. P. 1744–1753. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10562-017-2049-x>.
16. Chen S., et al. Electronic metal-support interactions and their promotional effect on CO₂ methanation on Ru/ZrO₂ catalysts. *Journal of Catalysis*. 2021. Vol. 400. P. 407–420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2021.06.028>.
17. Characterization I (molecular sieves). Springer, 1999. 420 p.
18. Courthéoux L., et al. Platinum supported on doped alumina catalysts for propulsion applications. Xerogels versus aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2004. Vol. 350. P. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.06.051>.
19. Товажнянський Л. Л., Ведь В. Е., Гусева Н. І., Вербя А. Г. Керамічні нагрівачі для енергоз ефектної на правленої передачі тепла. *Оборудование. Інструмент*. 2006. № 3. С. 96–98.

20. Qian C., et al. Effect of sintering aids on mechanical properties and microstructure of alumina ceramic via stereolithography. *Ceramics International*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.118>
21. Kim M.-Y., et al. Coating SiO₂ support with TiO₂ or ZrO₂ and effects on structure and CO oxidation performance of Pt catalysts. *Catalysts*. 2013. Vol. 3, No.1. P. 88–103. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal3010088>.
22. Saravanan G., et al. Pt₃Ti nanoparticles: fine dispersion on SiO₂ supports, enhanced catalytic CO oxidation, and chemical stability at elevated temperatures. *Langmuir*. 2010. Vol. 26, No. 13. P. 11446–11451. DOI: <https://doi.org/10.1021/la100942h>.
23. Zhang Y., et al. Constructing efficient CuO-based CO oxidation catalysts with large specific surface area mesoporous CeO₂ nanosphere support. *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14, No. 6. P. 485. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14060485>.
24. Brinker C. J., Scherer G. W. Sol-Gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing. Elsevier Science & Technology Books, 2013. 912 p.
25. Lee K. S., Baek M. Y., Assanis D. N. Feasibility Study on Quartz Liner Application for Marine Diesel Engine Visualization. *Journal of Ship and Ocean Technology*. 2004. Vol. 8, No. 4. P. 34–44.
26. Tian X., et al. The study of Pt/zeolites for CO oxidation: effects of skeleton structure and Si/Al ratio. *SSRN Electronic Journal*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4374832>.
27. Kang S., Ryu J., Kim J., Kim H., Lee C., Lee Y., Jun K. Fischer–Tropsch synthesis of the promoted Co/ZSM5 hybrid catalysts for the production of gasoline range hydrocarbons. *Modern Research in Catalysis*. 2014. Vol. 3. P. 99–106. DOI: 10.4236/mrc.2014.33013.
28. Wang X., Li Y., Zhou Y., et al. Recent advances of zeolites in catalytic oxidations of volatile organic compounds. *Catalysis Today*. 2022. Vol. 405. P. 150–165. DOI: 10.1016/j.cattod.2022.03.012.
29. Zhang Z., Liu Y., Wang J., et al. Opportunities and challenges of Cu based small pore zeolites applied to environmental catalysis. *National Science Review*. 2024. Vol. 8, No.10. nwab010. DOI: 10.1093/nsr/nwab010.
30. Gao F., et al. Understanding ammonia selective catalytic reduction kinetics over Cu/SSZ-13 from motion of the Cu ions. *Journal of Catalysis*. 2014. Vol. 319. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2014.08.010>.
31. Zhang R., et al. Structure–activity relationships of Cu-CHA in NH₃–SCR. *Chem-CatChem*. 2017. No. 9 (9). P. 1552–1556. DOI: 10.1002/cctc.201601362.
32. Yu J., et al. Impact of hydrothermal aging on Cu/SSZ-13. *ACS Catalysis*. 2020. Vol. 10, No. 4. P. 2298–2311. DOI: 10.1021/acscatal.9b04793.
33. Zhu Y., Du C., Feng Z., Chen Y., Li H., Chen R., Shen M., Shan B. Highly dispersed Pd on macroporous SmMn₂O₅ mullite for low-temperature oxidation of CO and C₃H₈. *RSC Advances*. 2018. Vol. 8. P. 5459–5467. DOI: 10.1039/C7RA11551B.
34. Casarrubios F., et al. Characterization of the evolution with temperature of the structure and properties of geopolymer-cordierite composites. *Ceramics*. 2024. Vol. 7, No. 4. P. 1513–1532. DOI: <https://doi.org/10.3390/ceramics7040098>.
35. Hajimirzaee S., Doyle A. M. 3D printed catalytic converters with enhanced activity for low-temperature methane oxidation in dual-fuel engines. *Fuel*. 2020. Vol. 274. P. 117848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117848>.
36. Краснокутский Е. В., Ведь В. Е., Пономаренко А. В., Коций В. А. Стенд для изучения кинетических и газодинамических параметров каталитических процессов очистки газов. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2013. № 2. С. 82–86.
37. Germgård U. The Arrhenius Equation is Still a Useful Tool in Chemical Engineering. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2017. Vol. 32, No. 1. P. 21–24. DOI: <https://doi.org/10.3183/npprj-2017-32-01-p021-024>.

Bibliography (transliterated)

1. Comotti M., et al. Support effect in high activity gold catalysts for CO oxidation. *Journal of the American Chemical Society*. 2006. Vol. 128, No. 3. P. 917–924. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja0561441>.
2. Trovarelli A. Catalytic properties of ceria and CeO₂-containing materials. *Catalysis Reviews*. 1996. Vol. 38, No. 4. P. 439–520. DOI: <https://doi.org/10.1080/01614949608006464>.
3. Montini T., et al. Fundamentals and catalytic applications of CeO₂-based materials. *Chemical Reviews*. 2016. Vol. 116, No. 10. P. 5987–6041. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00603>.
4. Sun C., Li H., Chen L. Nanostructured ceria-based materials: synthesis, properties, and applications. *Energy & Environmental Science*. 2012. Vol. 5, No. 9. P. 8475. DOI: <https://doi.org/10.1039/c2ee22310d>.
5. Bozo C., Guillaume N., Herrmann J.-M. Role of the ceria–zirconia support in the reactivity of platinum and palladium catalysts for methane total oxidation under lean conditions. *Journal of Catalysis*. 2001. Vol. 203, No. 2. P. 393–406. DOI: <https://doi.org/10.1006/jcat.2001.3320>.
6. Fujiwara A., et al. Thermal deactivation of ZrO₂ Pd/CeO₂ three-way catalysts during real engine aging: analysis by a surface plus peripheral site model. *ACS Omega*. 2020. Vol. 5, No. 44. P. 28897–28906. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04644>.
7. Putla S. B., et al. Review of Shape-Controlled CeO₂ Nanocatalysts for Purification of Auto-Exhaust Pollutants. *ACS Applied Nano Materials*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c00228>.
8. Kim Y., Lee H., Kwak J. H. Mechanism of CO oxidation on Pd/CeO₂ (100): the unique surface-structure of CeO₂ (100) and the role of peroxide. *ChemCatChem*. 2020. Vol. 12, No. 20. P. 5164–5172. DOI: <https://doi.org/10.1002/cctc.202000714>.
9. Busca G., et al. Chemical and mechanistic aspects of the selective catalytic reduction of NO by ammonia over oxide catalysts: a review. *Applied Catalysis B: Environmental*. 1998. Vol. 18, No. 1–2. P. 1–36. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0926-3373\(98\)00040-x](https://doi.org/10.1016/s0926-3373(98)00040-x).
10. Li J., et al. Low-temperature selective catalytic reduction of NO_x with NH₃ over metal oxide and zeolite catalysts – A review. *Catalysis Today*. 2011. Vol. 175, No. 1. P. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2011.03.034>.
11. Granger P., Parvulescu V. I. Catalytic NO_x-abatement systems for mobile sources: from three-way to lean burn after-treatment technologies. *Chemical Reviews*. 2011. Vol. 111, No. 5. P. 3155–3207. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr100168g>.
12. Christensen S. R., et al. Selective catalytic reduction of NO_x over V₂O₅-WO₃-TiO₂ SCR catalysts – a study at elevated pressure for maritime pre-turbine SCR configuration. *Emission Control Science and Technology*. 2019. Vol. 5, No. 3. P. 263–278. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40825-019-00127-0>.
13. Ye B., et al. Recent trends in vanadium-based SCR catalysts for NO_x reduction in industrial applications: stationary sources. *Nano Convergence*. 2022. Vol. 9, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40580-022-00341-7>.
14. Ftouni J., et al. ZrO₂ is preferred over TiO₂ as support for the Ru-catalyzed hydrogenation of levulinic acid to γ -valerolactone. *ACS Catalysis*. 2016. Vol. 6, No. 8. P. 5462–5472. DOI: <https://doi.org/10.1021/acscatal.6b00730>.
15. Coşkuner Filiz B., et al. Highly selective hydrogenation of levulinic acid to γ -valerolactone over Ru/ZrO₂ catalysts. *Catalysis Letters*. 2017. Vol. 147, No. 7. P. 1744–1753. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10562-017-2049-x>.

16. Chen S., et al. Electronic metal-support interactions and their promotional effect on CO₂ methanation on Ru/ZrO₂ catalysts. *Journal of Catalysis*. 2021. Vol. 400. P. 407–420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2021.06.028>.
17. Characterization I (molecular sieves). Springer, 1999. 420 p.
18. Courthéoux L., et al. Platinum supported on doped alumina catalysts for propulsion applications. Xerogels versus aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2004. Vol. 350. P. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.06.051>.
19. Tovazhniansky L. L., Ved V. E., Husieva N. I., Verba A. H. Keramicheskiye nahrevately dlia enerhoeffektyvnoi napravlennoi peredachy tepla. *Oborudovanye. Instrument*. 2006. No. 3. P. 96–98.
20. Qian C., et al. Effect of sintering aids on mechanical properties and microstructure of alumina ceramic via stereolithography. *Ceramics International*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.118>
21. Kim M.-Y., et al. Coating SiO₂ support with TiO₂ or ZrO₂ and effects on structure and CO oxidation performance of Pt catalysts. *Catalysts*. 2013. Vol. 3, No. 1. P. 88–103. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal3010088>.
22. Saravanan G., et al. Pt₃Ti nanoparticles: fine dispersion on SiO₂ supports, enhanced catalytic CO oxidation, and chemical stability at elevated temperatures. *Langmuir*. 2010. Vol. 26, No. 13. P. 11446–11451. DOI: <https://doi.org/10.1021/la100942h>.
23. Zhang Y., et al. Constructing efficient CuO-based CO oxidation catalysts with large specific surface area mesoporous CeO₂ nanosphere support. *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14, No. 6. P. 485. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14060485>.
24. Brinker C. J., Scherer G. W. Sol-Gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing. *Elsevier Science & Technology Books*, 2013. 912 p.
25. Lee K. S., Baek M. Y., Assanis D. N. Feasibility Study on Quartz Liner Application for Marine Diesel Engine Visualization. *Journal of Ship and Ocean Technology*. 2004. Vol. 8, No. 4. P. 34–44.
26. Tian X., et al. The study of Pt/zeolites for CO oxidation: effects of skeleton structure and Si/Al ratio. *SSRN Electronic Journal*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4374832>.
27. Kang S., Ryu J., Kim J., Kim H., Lee C., Lee Y., Jun K. Fischer–Tropsch synthesis of the promoted Co/ZSM5 hybrid catalysts for the production of gasoline range hydrocarbons. *Modern Research in Catalysis*. 2014. Vol. 3. P. 99–106. DOI: 10.4236/mrc.2014.33013.
28. Wang X., Li Y., Zhou Y., et al. Recent advances of zeolites in catalytic oxidations of volatile organic compounds. *Catalysis Today*. 2022. Vol. 405. P. 150–165. DOI: 10.1016/j.cattod.2022.03.012.
29. Zhang Z., Liu Y., Wang J., et al. Opportunities and challenges of Cu based small pore zeolites applied to environmental catalysis. *National Science Review*. 2024. Vol. 8, No. 10. nwab010. DOI: 10.1093/nsr/nwab010.
30. Gao F., et al. Understanding ammonia selective catalytic reduction kinetics over Cu/SSZ-13 from motion of the Cu ions. *Journal of Catalysis*. 2014. Vol. 319. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2014.08.010>.
31. Zhang R., et al. Structure–activity relationships of Cu-CHA in NH₃–SCR. *ChemCatChem*. 2017. No. 9 (9). P. 1552–1556. DOI: 10.1002/cctc.201601362.
32. Yu J., et al. Impact of hydrothermal aging on Cu/SSZ-13. *ACS Catalysis*. 2020. Vol. 10, No. 4. P. 2298–2311. DOI: 10.1021/acscatal.9b04793.
33. Zhu Y., Du C., Feng Z., Chen Y., Li H., Chen R., Shen M., Shan B. Highly dispersed Pd on macroporous SmMn₂O₅ mullite for low-temperature oxidation of CO and C₃H₈. *RSC Advances*. – 2018. – Vol. 8. – P. 5459–5467. – DOI: 10.1039/C7RA11551B.

34. Casarrubios F., et al. Characterization of the evolution with temperature of the structure and properties of geopolymer-cordierite composites. *Ceramics*. 2024. Vol. 7, No. 4. P. 1513–1532. DOI: <https://doi.org/10.3390/ceramics7040098>.

35. Hajimirzaee S., Doyle A. M. 3D printed catalytic converters with enhanced activity for low-temperature methane oxidation in dual-fuel engines. *Fuel*. 2020. Vol. 274. P. 117848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117848>.

36. Krasnokutskyi E. V., Ved V. E., Ponomarenko A. V., Koshchyi V. A. Stend dlia yzuchenyia kyneticheskykh y hazodynamycheskykh parametrov katalytycheskykh protsessov ochystky hazov. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2013. No. 2. P. 82–86.

37. Germgård U. The Arrhenius Equation is Still a Useful Tool in Chemical Engineering. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2017. Vol. 32, No. 1. P. 21–24. DOI: <https://doi.org/10.3183/npprj-2017-32-01-p021-024>.

УДК 544.47

В. Є. Ведь, д-р техн. наук, професор, О. В. Ведь, канд. техн. наук, доцент,
С. Широков, аспірант

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЕРВИННИХ НОСІЇВ КАТАЛІЗАТОРІВ КОНВЕРСІЇ СО

Оксид вуглецю (СО) є високотоксичним компонентом викидів двигунів внутрішнього згоряння та промислових газів, що вимагає ефективних методів нейтралізації шляхом каталітичного окиснення до СО₂. Ключову роль у ефективності нейтралізаторів відіграють первинні носії каталізаторів, від властивостей яких залежать активність, стабільність та вартість системи. У цій роботі проведено експериментальне порівняння каталітичної активності трьох керамічних носіїв: плавленого корунду (α -Al₂O₃, 99,98 %), промислового кордієриту (2MgO·2Al₂O₃·5SiO₂) та мулітокремнезему (3Al₂O₃·2SiO₂), що розглядаються як потенційні основи для каталізаторів конверсії СО.

Експериментальна частина роботи виконалася на спеціалізованій установці з використанням модельної газової суміші, що імітує склад реальних відпрацьованих газів. Досліджувані носії були підготовлені у вигляді квазікубічних зразків, сукупний об'єм яких (1 см³) заповнював робочий простір проточного реактора. Каталітичну активність кожного носія оцінювали шляхом вимірювання ступеня перетворення СО (%) у функції від температури в діапазоні 200–500 °С у стаціонарних умовах.

Отримані результати виявили суттєві відмінності у каталітичній поведінці матеріалів. Корунд (α -Al₂O₃) продемонстрував найвищу активність: різке зростання конверсії СО спостерігалось, починаючи з 300–350 °С, досягаючи значення ~0,40 % при 500 °С. Ця висока ефективність пояснюється його видатною термостабільністю, розвинутою питомою поверхнею та значною кількістю поверхневих активних центрів. Кордієрит показав помірну каталітичну активність: плавне зростання конверсії відмічалось з 250–300 °С, досягаючи максимуму ~0,24 %. Мулітокремнезем виявив найнижчу активність серед досліджених носіїв: реакція окиснення СО ініціювалася лише за ~300 °С, а максимальний ступінь перетворення не перевищував ~0,08 %, що вказує на його обмежений каталітичний потенціал для цього застосування.

Отримані результати, дозволяють зробити висновок, що в гетерогенному каталізі енергія активації не є виключним критерієм оцінки каталітичної активності, оскільки остання визначається комплексом факторів, таких як морфологія та площа поверхні каталізатора, кількість і природа його активних центрів, здатність до адсорбції молекул, а також наявність кисневих вакансій чи інших дефектів кристалічної ґратки, що підкрес-

лює необхідність комплексного підходу до оцінки каталітичних матеріалів, який враховує як їх кінетичні, так і структурно-хімічні характеристики.

Ключові слова: носії каталізаторів, конверсія оксиду вуглецю, каталітична активність, енергія активації, корунд, мулітокремнезем, кордієрит.

V. E. Ved, O. V. Ved, S. Shyrokov

INVESTIGATION OF PRIMARY CATALYST SUPPORT PROPERTIES FOR CO CONVERSION

Carbon monoxide (CO) is a highly toxic component of internal combustion engine exhaust and industrial gases, requiring efficient neutralization methods through catalytic oxidation to CO₂. Primary catalyst supports play a key role in the efficiency of neutralizers, as the activity, stability, and cost of the system depend on their properties. This work presents an experimental comparison of the catalytic activity of three ceramic supports: fused corundum (α -Al₂O₃, 99.98 %), industrial cordierite (2MgO·2Al₂O₃·5SiO₂), and mullite-silica (3Al₂O₃·2SiO₂), considered as potential bases for CO conversion catalysts.

The experimental work was performed on a specialized setup using a model gas mixture simulating the composition of real exhaust gases. The studied supports were prepared as quasi-cubic samples, with a total volume (1 cm³) filling the working space of a flow reactor. The catalytic activity of each support was evaluated by measuring the degree of CO conversion (%) as a function of temperature in the range of 200–500 °C under steady-state conditions.

The results revealed significant differences in the catalytic behavior of the materials. Corundum (α -Al₂O₃) demonstrated the highest activity: a sharp increase in CO conversion was observed starting at 300–350 °C, reaching ~0.40 % at 500 °C. This high efficiency is attributed to its exceptional thermal stability, developed specific surface area, and significant number of surface active sites. Cordierite showed moderate catalytic activity: a gradual increase in conversion was noted from 250–300 °C, peaking at ~0.24 %. Mullite-silica exhibited the lowest activity among the studied supports: CO oxidation initiated only at ~300 °C, with a maximum conversion not exceeding ~0.08 %, indicating its limited catalytic potential for this application.

The findings allow us to conclude that in heterogeneous catalysis, activation energy is not the sole criterion for evaluating catalytic activity. The latter is determined by a complex of factors, including catalyst morphology and surface area, the number and nature of active sites, molecular adsorption capacity, and the presence of oxygen vacancies or other crystal lattice defects. This highlights the necessity of a holistic approach to evaluating catalytic materials, considering both their kinetic and structural-chemical characteristics.

Keywords: catalyst supports, carbon monoxide conversion, catalytic activity, activation energy, corundum, mullite-silica, cordierite.

Н. О. Кануннікова, д-р філософії, старший наук. співроб., А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, А. О. Сакун, д-р філософії, доцент, О. В. Матющенко, аспірант, О. В. Шестопапов, канд. техн. наук, доцент

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ АЕС ЗАСОБАМИ ПОВЕРХНЕВОЇ ІНЖЕНЕРІЇ В УМОВАХ ЕКОЛОГІЧНИХ ВИКЛИКІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: атомна енергетика, екологічна безпека, захисні покриття, корозія, поверхнева інженерія, техногенні ризики, надійність обладнання.

Вступ. Атомна енергетика залишається важливим компонентом енергетичного балансу багатьох країн світу завдяки високій енергоємності ядерного палива та здатності забезпечувати стабільне виробництво електроенергії при відносно невеликих витратах ресурсів. Проте ефективна експлуатація атомних електростанцій (АЕС) пов'язана з численними техногенними викликами, зокрема із деградацією обладнання, що може призводити до порушення цілісності систем охолодження, виникнення витоків радіонуклідів та можливих аварійних ситуацій. Сучасні дослідження підтверджують, що пошкодження ключових елементів енергетичного обладнання має безпосередній вплив на збільшення ризику витoku шкідливих речовин у довкілля, що створює загрозу як для здоров'я населення, так і для екосистем [1, 2]. Як зазначено у [3], ядерний паливний цикл, що включає видобуток урану, його збагачення, використання в реакторах та утилізацію відходів, створює значні екологічні виклики. Зокрема, природний уран, що складається з ізотопів ^{235}U та ^{238}U , є джерелом радіоактивних продуктів ділення, таких як ^{133}Xe , ^{131}I та ^{144}Ce , які можуть потрапляти в довкілля через мікротріщини в обладнанні. Навіть за нормальних умов експлуатації ризик хронічного викиду ізотопів через деградацію матеріалів залишається актуальним, що підкреслює необхідність використання захисних покриттів для забезпечення герметичності бар'єрних систем.

Зростання експлуатаційних навантажень, інтенсивність хімічних та термічних впливів, а також вплив радіації спричиняють поступову втрату первинних властивостей конструкційних матеріалів в обладнанні АЕС. На практиці це відображається у значному зниженні терміну служби критичних елементів, таких як трубопроводи, теплообмінники та контури охолодження, що стають вразливими до корозійних процесів [4]. Схема основних технологічних контурів реактора типу ВВЕР демонструє ключову роль першого контуру в ізоляції радіоактивного теплоносія від довкілля. Пошкодження трубопроводів або теплообмінників першого контуру через корозію чи ерозію може призвести до витoku радіонуклідів. Застосування захисних покриттів, таких як хромові або алюмінієві шари, знижує інтенсивність корозійних процесів, що підтверджується дослідженнями [4, 5], і забезпечує надійність бар'єрних систем, мінімізуючи ризик екологічних аварій. Деформація, мікротріщини та інші пошкодження не лише знижують технічну надійність, але й можуть стати причиною витоків радіоактивних речовин, що в умовах аварій може призвести до масштабних екологічних катастроф.

У зв'язку з цим виникає необхідність у пошуку ефективних методів запобігання деградації поверхонь матеріалів, що використовуються в обладнанні АЕС. Сучасна по-

верхнева інженерія, заснована на використанні захисних покриттів, демонструє значний потенціал у збільшенні стійкості матеріалів до корозії, термічного старіння та впливу радіації [6–8]. Функціональні покриття, отримані з використанням електрохімічного осадження, плазмової або термічної обробки, здатні створювати додатковий бар'єр між агресивним середовищем і основною металеву структурою обладнання. Такі технології дозволяють не лише продовжити експлуатаційний ресурс обладнання, але й зменшити ризики аварійних ситуацій, що безпосередньо впливають на екологічну безпеку [9]. За даними [10], рідкі радіоактивні відходи зберігаються у спеціальних бетонних сховищах, що потребує значних ресурсів для їхньої утилізації. Застосування захисних покриттів на основі хрому або титану, як показано в [4, 6], дозволяє зменшити частоту заміни обладнання, що піддається корозії, а отже, скоротити обсяги радіоактивних відходів, які виникають у процесі ремонтів та утилізації зношених компонентів, що сприяє зниженню екологічного навантаження та відповідає принципам сталого розвитку в атомній енергетиці.

Важливим аспектом є інтеграція нових покриттів з сучасними системами моніторингу та контролю, що дозволяє оперативно визначати стан покриттів і вчасно проводити профілактичні заходи. Системи захисту реактора при втраті теплоносія дозволяють оперативно виявляти мікрODEфектів і замінювати пошкоджені елементи [11]. Однак, як показано в [6, 12], використання захисних покриттів може попередити появу таких дефектів, зменшуючи потребу в аварійних зупинках і знижуючи ризик неконтрольованого викиду радіонуклідів, що особливо важливо з огляду на наслідки аварій на Чорнобильській та Фукусімській АЕС, де деградація матеріалів посилила екологічні наслідки [1, 12]. За даними сучасних досліджень, використання методів імпедансної спектроскопії дозволяє передбачити деградацію покриттів на ранніх етапах, що сприяє підвищенню загальної безпеки роботи АЕС [2]. Крім того, впровадження новітніх матеріалознавчих рішень сприяє зниженню обсягів відходів у виробничих процесах, що є важливим елементом сучасної екологічної політики на ринку енергетики.

Актуальність дослідження підкріплюється й даними, отриманими після аварійних ситуацій на Чорнобильській та Фукусімській АЕС, де пошкодження обладнання значно посилює екологічну загрозу через розповсюдження радіонуклідів [1]. В умовах сучасної геополітичної нестабільності та зростаючих вимог щодо екологічної відповідальності технологічні рішення, спрямовані на підвищення надійності за допомогою захисних покриттів, набувають особливої ваги.

Метою даної статті є обґрунтування доцільності застосування сучасних методів поверхневої інженерії для підвищення експлуатаційної надійності та екологічної безпеки енергетичного обладнання АЕС. У роботі аналізуються основні джерела ризиків, наслідки аварійних ситуацій та перспективи використання інноваційних захисних покриттів для запобігання деградації матеріалів.

Необхідність модернізації існуючих конструкцій через використання нових матеріалів і технологій покриття підтверджується як науковими дослідженнями [14], так і практичними результатами експериментальних робіт. У майбутньому розробка та впровадження таких систем має стати основою для зниження інцидентів, пов'язаних із пошкодженням обладнання, і сприятиме сталому розвитку атомної енергетики.

Схема основних технологічних контурів АЕС з реактором ВВЕР (рис. 1) ілюструє двоконтурну систему, яка забезпечує ефективне виробництво електроенергії з використанням теплоти активної зони реактора.

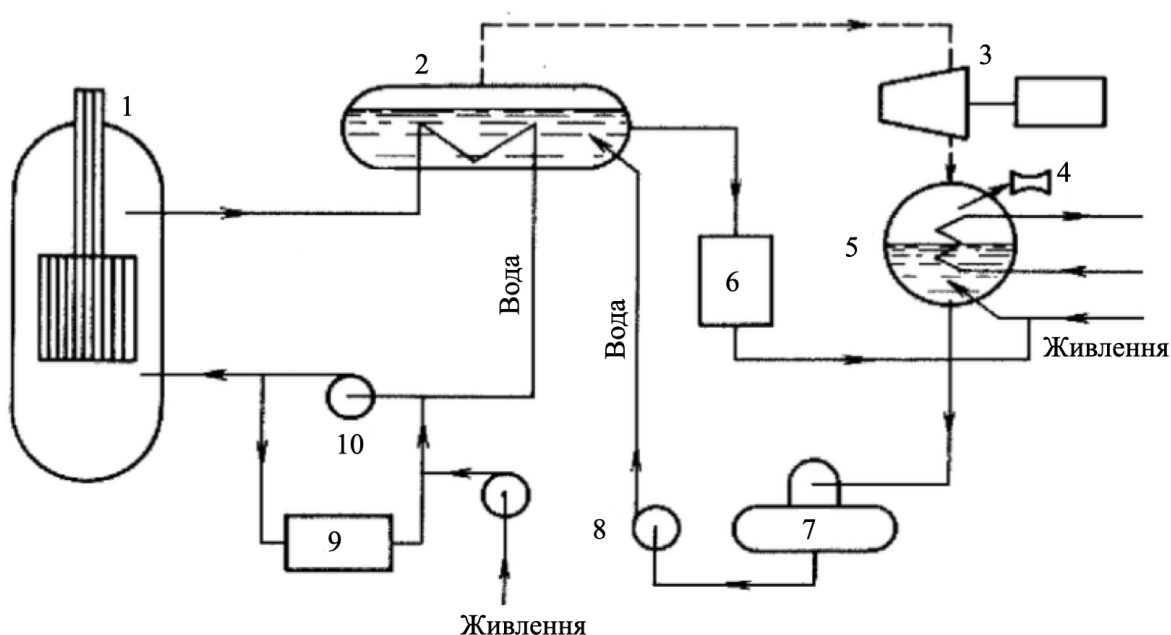


Рисунок 1 – Схема основних технологічних контурів АЕС з реактором ВВЕР:
1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – турбогенератор; 4 – ежектор; 5 – конденсатор;
6 – спеціальне водоочищення другого контуру; 7 – деаератор; 8 – живильний насос;
9 – байпасне очищення; 10 – головний циркуляційний насос

Тепло від реактора (поз. 1) передається через парогенератор (поз. 2) до другого контуру, де вода перетворюється на пар для турбогенератора (поз. 3). Відпрацьований пар конденсується (поз. 5), очищається (поз. 6 та 7) і повертається насосами (поз. 8) до парогенератора. Перший контур ізолюваний від другого, що мінімізує ризик витоку радіонуклідів. Байпасне очищення (поз. 9) і головний циркуляційний насос (поз. 10) забезпечують безпеку та ефективність роботи першого контуру.

Проте, незважаючи на ефективну ізоляцію, тривала експлуатація першого контуру під високим тиском і температурою (15,7 МПа та до 322 °С) призводить до деградації матеріалів, таких як трубопроводи та теплообмінники, що може спричинити корозію, мікротріщини та потенційні витoki радіоактивних речовин. Це підкреслює важливість додаткових захисних заходів для підвищення надійності системи. На рис. 2 наведено деталізовану схему, яка ілюструє принципи застосування таких заходів. Зокрема, перший контур виконує критично важливу функцію – він ізолює радіоактивний теплоносі, який циркулює між активною зоною реактора і парогенератором, не допускаючи його контакту з компонентами другого контуру, де утворюється пара для турбіни, що забезпечує захист навколишнього середовища і персоналу від радіоактивного опромінення навіть у разі аварійної ситуації.

На схемі зазначено ключові зони застосування захисних покриттів, які знижують ризик корозії, утворення мікротріщин і витоку радіонуклідів, а також сприяють довговічності обладнання. У схемі виділено системи моніторингу (імпедансна спектроскопія) та аварійного захисту, а також показано, що завдяки ефективним покриттям зменшуються обсяги радіоактивних відходів.

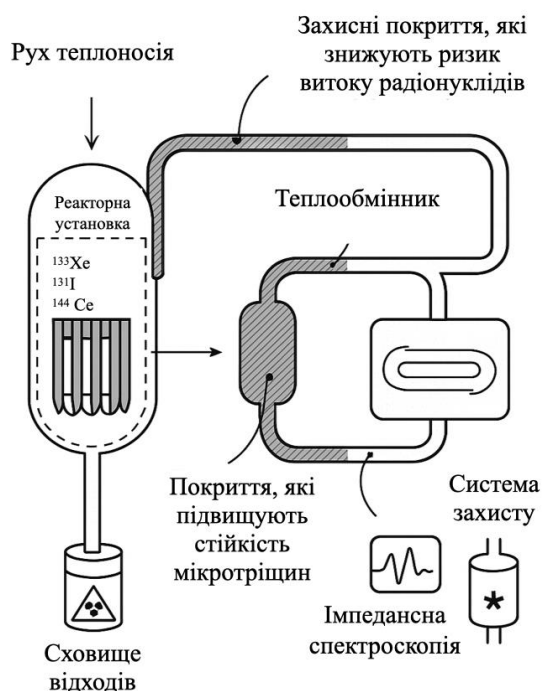


Рисунок 2 – Схема першого контуру реактора типу ВВЕР із застосуванням захисних покриттів

Обговорення результатів. Умови експлуатації енергетичного обладнання АЕС характеризуються складним поєднанням впливів: високотемпературного середовища, інтенсивного нейтронного опромінення, агресивного хімічного впливу теплоносія та циклічного навантаження. Усе це призводить до прискореної деградації конструкційних матеріалів, зокрема металевих компонентів першого контуру реакторів [15, 16].

Особливу небезпеку становлять корозійно-механічне руйнування, хімічна корозія, ерозія поверхонь, а також радіаційне ушкодження кристалічної ґратки металів. Як зазначено у роботі [17], значна частина аварій на ядерних об'єктах пов'язана саме з втратою цілісності матеріалів, що виконують бар'єрні функції між радіоактивною речовиною і навколишнім середовищем. Наприклад, оболонки тепловидільних елементів (твелів) піддаються корозії під дією боровмісного теплоносія та накопиченням гідрогену, що спричиняє гідридне крихке руйнування. Аналогічно, трубопроводи та теплообмінники першого контуру зазнають інтенсивної ерозійно-корозійної дії, особливо у зонах турбулентності. Авторами [18] встановлено, що навіть у нормальному режимі експлуатації існує ризик хронічного викиду ізоотопів через мікропошкодження металевих оболонок, що спричиняє тривалий екологічний вплив. Варто наголосити, що сучасні дослідження свідчать про поступове зменшення ресурсу конструкцій за рахунок кумулятивного ефекту опромінення та високих температур, що, за відсутності додаткових захисних рішень, може призвести до аварій із викидом радіоактивних речовин у довкілля [12, 19].

Деградація конструкційних матеріалів, що експлуатуються в умовах підвищеного температурного та радіаційного навантаження, безпосередньо впливає на рівень екологічної безпеки атомної електростанції. Зокрема, пошкодження оболонок тепловидільючих елементів, трубопроводів і зварних з'єднань першого контуру підвищує ризик неконтрольованого витоку радіонуклідів у довкілля. Навіть незначна втрата герметичності системи може призвести до проникнення радіоактивних речовин у водне або гру-

нтове середовище, спричиняючи довготривале забруднення. Дослідження [6] показують, що такі витoki частіше спостерігаються в регіонах, де проживають соціально вразливі групи населення, що посилює явище екологічної несправедливості, коли вплив техногенних факторів стає непропорційно вищим для окремих спільнот. Крім того, наслідки аварійної деградації матеріалів можуть бути масштабними. Як свідчить аналіз подій на АЕС у Чорнобилі та Фукусімі, у разі критичних пошкоджень забруднення охоплює значні площі, а екосистеми потребують десятиліть для часткового відновлення [12].

Ризик накопичення довгоживучих ізотопів існує навіть за нормальних умов експлуатації, особливо в процесі охолодження та зберігання відпрацьованого палива, що підтверджує важливість запровадження ефективних антикорозійних рішень, які дозволяють уникнути первинного порушення бар'єрних функцій обладнання та мінімізують техногенне навантаження на довкілля.

У процесі роботи реактора продукти ділення (зокрема ^{133}Xe , ^{131}I , ^{144}Ce) та активовані елементи конструкцій утворюють складну радіонуклідну суміш. Навіть незначна втрата герметичності оболонок твелів може спричинити витік таких ізотопів, зокрема тритію, через мікротріщини в охолоджуюче середовище.

Одним із найбільш ефективних способів запобігання деградації конструкційних матеріалів в умовах експлуатації атомних електростанцій є використання спеціалізованих захисних покриттів. Такі покриття формуються за допомогою методів поверхневої інженерії та здатні значно підвищити корозійну, термічну та радіаційну стійкість металів. Згідно з дослідженням [4], багаторічне спостереження за станом трубопроводів парогенераторів у реакторах типу ВВЕР показало, що застосування пасивувальних плівок знижує інтенсивність утворення оксидів та суттєво сповільнює процеси міжкристалітної корозії. Особливо ефективними виявилися покриття, модифіковані хромом, алюмінієм або титаном. У дослідженні [6, 12] підтверджено, що хромові та титанові шари забезпечують кращу адгезію, знижують окислення при 800 °C і підвищують стійкість до локалізованої корозії у хлоридних середовищах.

Захисні покриття не лише подовжують ресурс елементів обладнання, але й опосередковано впливають на екологічну безпеку. Зменшення кількості ремонтів, замін і утилізації зношених компонентів сприяє зниженню обсягу радіоактивних та хімічно активних відходів. Крім того, покращення герметичності технологічних бар'єрів мінімізує ймовірність витoku радіонуклідів у разі аварійної ситуації.

Інтеграція інноваційних захисних покриттів у практику української атомної енергетики є стратегічно доцільною, зважаючи на високий ступінь зносу основного обладнання та необхідність підвищення екологічної безпеки. Як підкреслюється у роботах [12, 18], екологічна модернізація АЕС є ключовим завданням у контексті забезпечення справедливого та безпечного енергетичного переходу.

Висновки. Аналіз показав, що деградація конструкційних матеріалів обладнання першого контуру АЕС, зокрема теплообмінників, оболонок твелів та зварних з'єднань, залишається одним із ключових техногенних ризиків для екологічної безпеки в енергетичному секторі. Пошкодження внаслідок корозії, термічних навантажень та радіаційного опромінення значно підвищує ймовірність аварій із витокom радіонуклідів, особливо в умовах зростаючих змін клімату та збільшення навантаження на існуючі енергоблоки. Використання сучасних захисних покриттів, зокрема на основі чорного хрому, модифікованого алюмінієм та титаном, дозволяє суттєво підвищити стійкість матеріалів до високотемпературного та електрохімічного впливу, зменшуючи ймовір-

ність втрати герметичності. Захисні технології поверхневої інженерії сприяють зменшенню обсягу радіоактивних відходів, подовженню ресурсу обладнання та загальному зниженню екологічного навантаження на довкілля.

Література

1. Lipka J., Slugen V., Toth I. et al. Phase Analysis of Corrosion Products from Nuclear Power Plants. *Hyperfine Interactions*. 2002. No. 139. P. 501–511. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021210425602>.
2. Aszódi A., Biró B., Adorján L. et al. The effect of the future of nuclear energy on the decarbonization pathways and continuous supply of electricity in the European Union. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. No. 415. 112688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112688>.
3. Alwaeli M., Mannheim V. Investigation into the Current State of Nuclear Energy and Nuclear Waste Management – A State-of-the-Art Review. *Energies*. 2022. No. 15(12). 4275. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124275>.
4. Baja B., Varga K., Szabó N. A. et al. Long-term trends in the corrosion state and surface properties of the stainless steel tubes of steam generators decontaminated chemically in VVER-type nuclear reactors. *Corrosion Science*. 2009. No. 51(12). P. 2831–2839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.007>.
5. Shtefan V. V., Kanunnikova N. A. Oxidation of AISI 304 steel in Al- and Ti-containing solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2020. No. 56. P. 379. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205120020239>.
6. Shtefan V., Kanunnikova N., Zuyok V. Comparative evaluation of microstructure and electrochemical, high-temperature corrosion rates of titanium- and aluminum-modified black chromium coatings on AISI 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2025. No. 497. 131706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131706>.
7. Skalozubov V., Melnik S., Vashchenko V. et al. The method of express analysis of nuclear and ecological safety during the modernization of nuclear fuel. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2023. No. 32(2). P. 388–395. DOI: <https://doi.org/10.15421/112335>.
8. Lin R. T., Boonhat H., Lin Y. Y. et al. Health Effects of Occupational and Environmental Exposures to Nuclear Power Plants: A Meta-Analysis and Meta-Regression. *Current Environmental Health Reports*. 2024. No. 11. P. 329–339. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40572-024-00453-8>.
9. Skalozubov V., Vierinov O., Kanivets A. et al. Risk-informed method for qualifying strategies for operation control of metal of safety related systems of nuclear power plants. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2023. No. 2(68). DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.05>.
10. Luhar I., Luhar S., Abdullah M. M. A. B., Sandu A. V., Vizureanu P., Razak R. A., Burduhos-Nergis D. D., Imjai T. Solidification/Stabilization Technology for Radioactive Wastes Using Cement: An Appraisal. *Materials*. 2023. Vol. 16, iss. 3. 954. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16030954>.

11. Slugeň V. Defence in Depth of VVER-440 Reactors. In: *Safety of VVER-440 Reactors*. 2011. P. 5–15. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-84996-420-3_3.
12. Klingelhöfer D., Braun M., Oremek G. M. et al. Global research on nuclear energy in the context of health and environmental risks, considering economic interests. *WIREs Energy Environ.* 2024. No. 13. e497. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.497>.
13. Ye Q.-Z. Safety and effective developing nuclear power to realize green and low-carbon development. *Advances in Climate Change Research*. 2016. No. 7(1–2). P. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.accres.2016.06.005>.
14. Khomiak E., Trishch R., Nazarko J. et al. Method of Quality Control of Nuclear Reactor Element Tightness to Improve Environmental Safety. *Energies*. 2025. No. 18. 2172. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092172>.
15. Brynk T., Perosanz Lopez F. J., McLennan A. Increase of nuclear installations safety by better understanding of materials performance and new testing techniques development (MEACTOS, INCEFA-SCALE, and FRACTESUS H2020 projects). *EPJ Nuclear Science and Technology*. 2022. No. 8. 42. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjn/2022033>.
16. Mondal D., Garai T., Roy G. C., Alam S. Evaluating the nuclear power plant safety system under neutrosophic environment. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2024. No. 72(1).
17. Korduba I., Patlashenko Z., Zhukova O. Prospects of Technological Improvement of Nuclear and Environmental Safety of World Energy. *Open Journal of Ecology*. 2023. No.13. P. 536–548. DOI: <https://doi.org/10.4236/oje.2023.138033>.
18. Höffken J., Ramana M. V. Nuclear power and environmental injustice. *WIREs Energy Environ.* 2024. No. 13. e498. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.498>.
19. Kravchenko V., Kozlov I., Vashchenko V. et al. Increasing the Efficiency and Level of Environmental Safety of Pro-Environmental City Heat Supply Technologies by Low Power Nuclear Plants. *World Journal of Nuclear Science and Technology*. 2024. No. 14. P. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjnst.2024.142006>.

Bibliography (transliterated)

1. Lipka J., Slugen V., Toth I. et al. Phase Analysis of Corrosion Products from Nuclear Power Plants. *Hyperfine Interactions*. 2002. No. 139. P. 501–511. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021210425602>.
2. Aszódi A., Biró B., Adorján L. et al. The effect of the future of nuclear energy on the decarbonization pathways and continuous supply of electricity in the European Union. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. No. 415, Article 112688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112688>.
3. Alwaeli M., Mannheim V. Investigation into the Current State of Nuclear Energy and Nuclear Waste Management – A State-of-the-Art Review. *Energies*. 2022. No. 15(12), Article 4275. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124275>.
4. Baja B., Varga K., Szabó N. A. et al. Long-term trends in the corrosion state and surface properties of the stainless steel tubes of steam generators decontaminated chemically in VVER-type nuclear reactors. *Corrosion Science*. 2009. No. 51(12). P. 2831–2839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.007>.

5. Shtefan V. V., Kanunnikova N. A. Oxidation of AISI 304 steel in Al- and Ti-containing solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2020. No. 56. P. 379. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205120020239>.
6. Shtefan V., Kanunnikova N., Zuyok V. Comparative evaluation of microstructure and electrochemical, high-temperature corrosion rates of titanium- and aluminum-modified black chromium coatings on AISI 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2025. No. 497, Article 131706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131706>.
7. Skalozubov V., Melnik S., Vashchenko V. et al. The method of express analysis of nuclear and ecological safety during the modernization of nuclear fuel. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2023. No. 32(2). P. 388–395. DOI: <https://doi.org/10.15421/112335>.
8. Lin R. T., Boonhat H., Lin Y. Y. et al. Health Effects of Occupational and Environmental Exposures to Nuclear Power Plants: A Meta-Analysis and Meta-Regression. *Current Environmental Health Reports*. 2024. No. 11. P. 329–339. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40572-024-00453-8>.
9. Skalozubov V., Vierinov O., Kanivets A. et al. Risk-informed method for qualifying strategies for operation control of metal of safety related systems of nuclear power plants. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2023. No. 2(68). DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.05>.
10. Luhar I., Luhar S., Abdullah M. M. A. B., Sandu A. V., Vizureanu P., Razak R. A., Burduhos-Nergis D. D., Imjai T. Solidification/Stabilization Technology for Radioactive Wastes Using Cement: An Appraisal. *Materials*. 2023. Vol. 16, iss. 3, Article 954. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16030954>.
11. Slugeň V. Defence in Depth of VVER-440 Reactors. In: *Safety of VVER-440 Reactors*. 2011. P. 5–15. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-84996-420-3_3.
12. Klingelhöfer D., Braun M., Oremek G. M. et al. Global research on nuclear energy in the context of health and environmental risks, considering economic interests. *WIREs Energy Environ*. 2024. No. 13. e497. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.497>.
13. Ye Q.-Z. Safety and effective developing nuclear power to realize green and low-carbon development. *Advances in Climate Change Research*. 2016. No. 7(1–2). P. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.accr.2016.06.005>.
14. Khomiak E., Trishch R., Nazarko J. et al. Method of Quality Control of Nuclear Reactor Element Tightness to Improve Environmental Safety. *Energies*. 2025. No. 18, Article 2172. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092172>.
15. Brynk T., Perosanz Lopez F. J., McLennan A. Increase of nuclear installations safety by better understanding of materials performance and new testing techniques development (MEACTOS, INCEFA-SCALE, and FRACTESUS H2020 projects). *EPJ Nuclear Science and Technology*. 2022. № 8. 42. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjn/2022033>.
16. Mondal D., Garai T., Roy G. C., Alam S. Evaluating the nuclear power plant safety system under neutrosophic environment. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2024. No. 72(1).
17. Korduba I., Patlashenko Z., Zhukova O. Prospects of Technological Improvement of Nuclear and Environmental Safety of World Energy. *Open Journal of Ecology*. 2023. No. 13. P. 536–548. DOI: <https://doi.org/10.4236/oje.2023.138033>.

18. Höffken J., Ramana M. V. Nuclear power and environmental injustice. *WIREs Energy Environ.* 2024. No. 13. e498. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.498>.

19. Kravchenko V., Kozlov I., Vashchenko V. et al. Increasing the Efficiency and Level of Environmental Safety of Pro-Environmental City Heat Supply Technologies by Low Power Nuclear Plants. *World Journal of Nuclear Science and Technology.* 2024. No. 14. P. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjnst.2024.142006>.

УДК 504.054

Н. О. Кануннікова, д-р філософії, старший наук. співроб., А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, А. О. Сакун, д-р філософії, доцент, О. В. Матющенко, аспірант, О. В. Шестопалов, канд. техн. наук, доцент

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ АЕС ЗАСОБАМИ ПОВЕРХНЕВОЇ ІНЖЕНЕРІЇ В УМОВАХ ЕКОЛОГІЧНИХ ВИКЛИКІВ

У роботі досліджено актуальну проблему підвищення надійності енергетичного обладнання атомних електростанцій (АЕС) шляхом застосування методів поверхневої інженерії в умовах екологічних викликів. Атомна енергетика відіграє ключову роль у забезпеченні стабільного енергопостачання, однак її ефективна експлуатація ускладнюється деградацією матеріалів обладнання через корозію, термічні та радіаційні впливи. Це створює ризики втрати герметичності бар'єрних систем, що може призвести до витоку радіонуклідів, таких як ^{133}Xe , ^{131}I , ^{144}Ce , та інших продуктів ядерного ділення, спричиняючи екологічні загрози. Дослідження акцентує увагу на застосуванні захисних покриттів, зокрема хромових, алюмінієвих і титанових, для зниження корозійних процесів, подовження терміну служби критичних елементів (трубопроводів, теплообмінників, оболонок твелів) та зменшення обсягів радіоактивних відходів.

У статті проаналізовано основні техногенні ризики, пов'язані з деградацією обладнання першого контуру реакторів типу ВВЕР, та розглянуто вплив корозії, ерозії та радіаційного ушкодження на екологічну безпеку. Показано, що сучасні методи поверхневої інженерії, такі як електрохімічне осадження та плазмова обробка, дозволяють створювати ефективні захисні шари, які знижують інтенсивність міжкристалітної корозії та гідридного руйнування. Інтеграція захисних покриттів із системами моніторингу, зокрема імпедансною спектроскопією, забезпечує раннє виявлення дефектів, зменшуючи ймовірність аварій.

Особлива увага приділена аналізу наслідків аварій на Чорнобильській та Фукусімській АЕС, які підкреслили критичну роль надійності обладнання в запобіганні екологічним катастрофам. Застосування захисних покриттів сприяє не лише підвищенню безпеки, але й зниженню екологічного навантаження шляхом скорочення обсягів відходів і ресурсів, необхідних для ремонту та утилізації.

Метою роботи є обґрунтування доцільності використання інноваційних покриттів для підвищення експлуатаційної надійності та екологічної безпеки АЕС. Дослідження підтверджує, що впровадження таких технологій відповідає принципам сталого

розвитку, знижуючи техногенне навантаження та сприяючи безпечному енергетичному переходу.

Ключові слова: атомна енергетика, екологічна безпека, захисні покриття, корозія, поверхнева інженерія, техногенні ризики, надійність обладнання.

N. O. Kanunnikova, A. S. Bosiuk, A. O. Sakun, O. V. Matiushchenko, O. V. Shestopalov

INCREASING THE RELIABILITY OF NPP POWER EQUIPMENT USING SURFACE ENGINEERING MEANS IN THE CONDITIONS OF ENVIRONMENTAL CHALLENGES

The paper investigates the topical issue of improving the reliability of nuclear power plant (NPP) equipment by applying surface engineering methods in the context of environmental challenges. Nuclear energy plays a key role in ensuring a stable energy supply, but its effective operation is complicated by the degradation of equipment materials due to corrosion, thermal and radiation effects. This creates risks of barrier system leaks, which can lead to the release of radionuclides such as ^{133}Xe , ^{131}I , ^{144}Ce , and other nuclear fission products, causing environmental threats. The study focuses on the use of protective coatings, in particular chrome, aluminium and titanium, to reduce corrosion processes, extend the service life of critical elements (pipelines, heat exchangers, fuel element cladding) and reduce the volume of radioactive waste.

The article analyses the main man-made risks associated with the degradation of VVER reactor primary circuit equipment and considers the impact of corrosion, erosion and radiation damage on environmental safety. It is shown that modern surface engineering methods, such as electrochemical deposition and plasma treatment, allow the creation of effective protective layers that reduce the intensity of intergranular corrosion and hydride destruction. The integration of protective coatings with monitoring systems, in particular impedance spectroscopy, ensures early detection of defects, reducing the likelihood of accidents.

Particular attention is paid to analysing the consequences of accidents at the Chernobyl and Fukushima nuclear power plants, which highlighted the critical role of equipment reliability in preventing environmental disasters. The use of protective coatings not only improves safety but also reduces the environmental impact by reducing the amount of waste and resources required for repair and disposal.

The aim of the work is to justify the use of innovative coatings to improve the operational reliability and environmental safety of nuclear power plants. The study confirms that the introduction of such technologies is consistent with the principles of sustainable development, reducing man-made impact and promoting a safe energy transition.

Keywords: nuclear energy, environmental safety, protective coatings, corrosion, surface engineering, man-made risks, equipment reliability.

В. І. Дешко^{1,2}, д-р техн. наук, професор, І. Ю. Білоус^{1,3}, канд. техн. наук, доцент,
І. О. Суходуб¹, канд. техн. наук, доцент, Г. О. Гетманчук¹, наук. співроб.,
С. О. Крамаренко¹, аспірант, А. В. Гавриш¹, аспірант

АНАЛІЗ ЗМІН СОНЯЧНИХ ТЕПЛОАДХОДЖЕНЬ І ВІТРОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК У РЕГІОНАХ УКРАЇНИ З ФОКУСОМ НА ЕКСТРЕМАЛЬНІ КЛІМАТИЧНІ УМОВИ

¹Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського", Україна

²Інститут технічної теплофізики НАН України, Україна

³Інститут загальної енергетики НАН України, Україна

Ключові слова: кліматичні данні, Meteonorm, GHI, екстремальні погодні умови, швидкість вітру, відновлювані джерела енергії.

Вступ. Зростання кліматичних ризиків, порушення традиційних енергетичних ланцюгів і необхідність переходу до сталої енергетики роблять питання ефективного використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в Україні критично важливим. Одним із ключових факторів у плануванні та впровадженні таких технологій є точна оцінка потенціалу сонячної та вітрової енергії з урахуванням просторової та часової варіативності кліматичних параметрів. Особливої уваги потребують дослідження в умовах екстремального клімату, оскільки саме вони дозволяють оцінити ефективність використання відновлювальних джерел енергії для забезпечення надійного автономного енергозабезпечення.

Наукові дослідження останніх років підтверджують актуальність глибокого аналізу кліматичних характеристик для ефективного проектування ВДЕ-систем. Так, у роботах [1, 2] обґрунтовується необхідність врахування довгострокових кліматичних трендів і сценаріїв змін при моделюванні енергоефективних технологій. У публікаціях [3, 4, 5] вказано на суттєві коливання рівнів сонячної радіації та вітрової активності у регіонах України, що вимагає регіонально специфічного підходу до розміщення та проектування ВДЕ-об'єктів. Крім того, міжнародні дослідження [6], зокрема в межах звітів МГЕЗК (IPCC) [7], демонструють значну залежність відновлювальних джерел енергії від змін клімату і закликають до використання сценаріїв Representative Concentration Pathways (RCP) при плануванні кліматостійкої інфраструктури.

В Україні нормативною базою для розрахунку енергоефективності будівель є ДСТУ 9190:2022 [8], який містить кліматичні параметри, сформовані на основі середньомісячних даних згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» [9]. Однак, дані цього стандарту відображають кліматичну ситуацію станом на 1961–2005 роки, що обмежує їхню релевантність в умовах сучасного клімату. Водночас актуальні кліматичні бази даних, зокрема Meteonorm [10], а також прогнозні сценарії RCP, дозволяють здійснювати більш точні оцінки в умовах як сучасного, так і майбутнього клімату, що має вирішальне значення для динамічного моделювання енергетичних характеристик будівель із використанням ВДЕ.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз змін сонячних теплонадходжень і вітрових характеристик у різних регіонах України на основі історичних, поточних і про-

гнозованих даних для оцінки потенціалу використання ВДЕ, з урахуванням викликів, пов'язаних з екстремальними кліматичними умовами та потребами в децентралізованому енергозабезпеченні.

Результати дослідження

Аналіз помісячних значень за історичні, поточні періоди та нормативних значень.

У цьому дослідженні проаналізовано зміну сонячних теплонадходжень та вітрових характеристик у різних регіонах України, доповнюючи результати роботи [11], в якій розглянуто аналіз температурних даних зовнішнього середовища з акцентом на можливі екстремальні умови за даними кліматичних баз України та Meteonorm [10].

Середньомісячні сонячні теплонадходження на горизонтальну поверхню (GHI) за поточний (1996–2015 роки) та історичний (1981–1990 роки) періоди, отримані з глобальної кліматичної бази Meteonorm [10] та відповідно ДСТУ 9190:2022 [8], представлені для чотирьох міст України, що є представниками двох кліматичних зон з північної, південної, західної та східної частин країни (рис. 1).

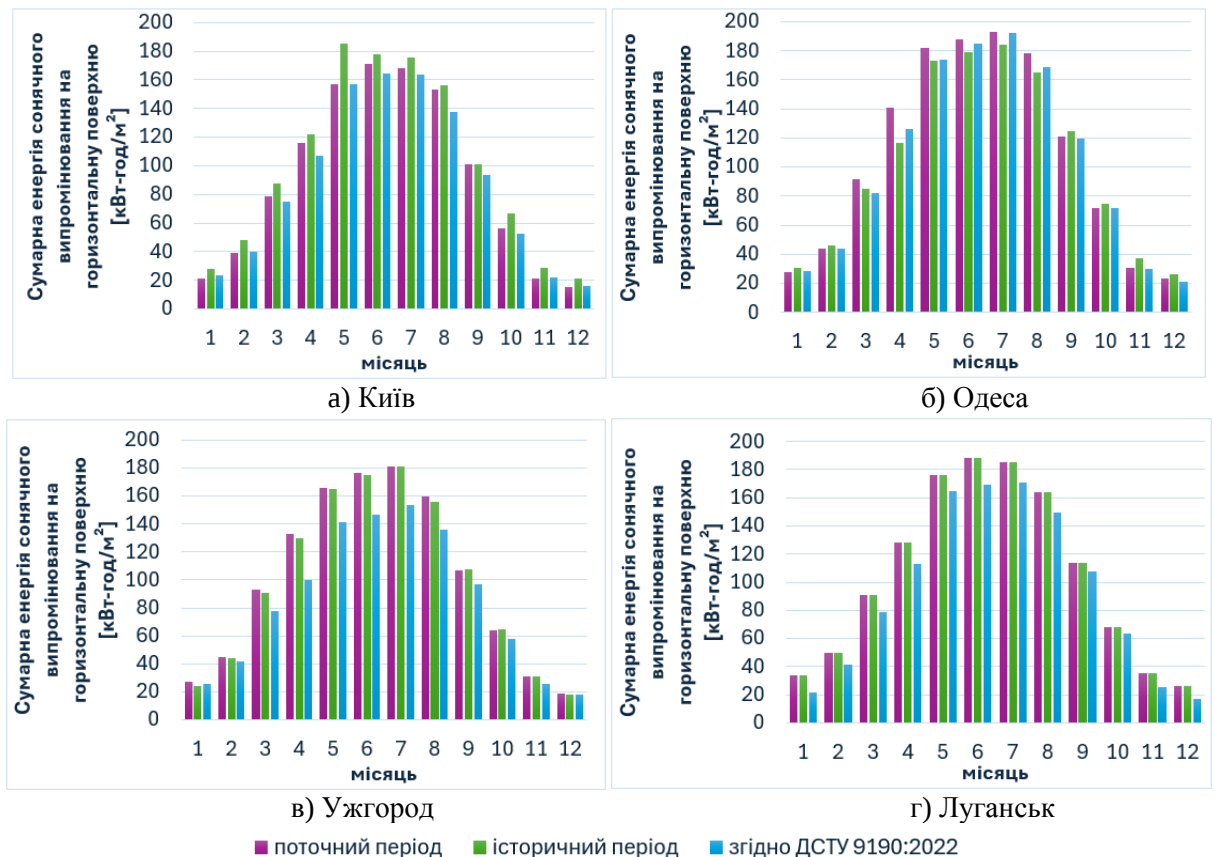


Рисунок 1 – Помісячна зміна сонячних теплонадходжень для різних міст за поточний період, відповідно історичних даних та ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія»

Аналіз показує, що найбільші відмінності між історичними та поточними значеннями GHI спостерігаються в перехідні сезони – особливо навесні (березень–травень). Зокрема, у місті Київ зафіксовано зниження GHI в порівнянні з історичним періодом у середньому на 8 % за рік, що може бути пов'язано як зі змінами атмосферної прозорості, так і з локальними змінами хмарності та аерозольного складу повітря.

Водночас, для південного регіону – Одеси – навпаки, зафіксовано збільшення ГНІ на 4 %, а для Ужгорода – на 1,4 %, що вказує на регіональну неоднорідність кліматичних змін. Для Луганська відмічено невелику різницю порівнюваних значень з незначними сезонними варіаціями.

Згідно статистичних помісячних даних з бази даних Meteonorm [10] за поточний (2000–2019 роки) та історичний (1981–1990 роки) періоди напрямки вітру є однаковими, а швидкості вітру різняться (рис. 2).

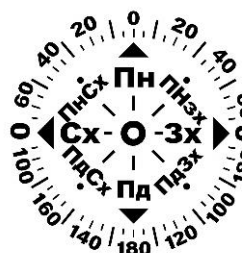
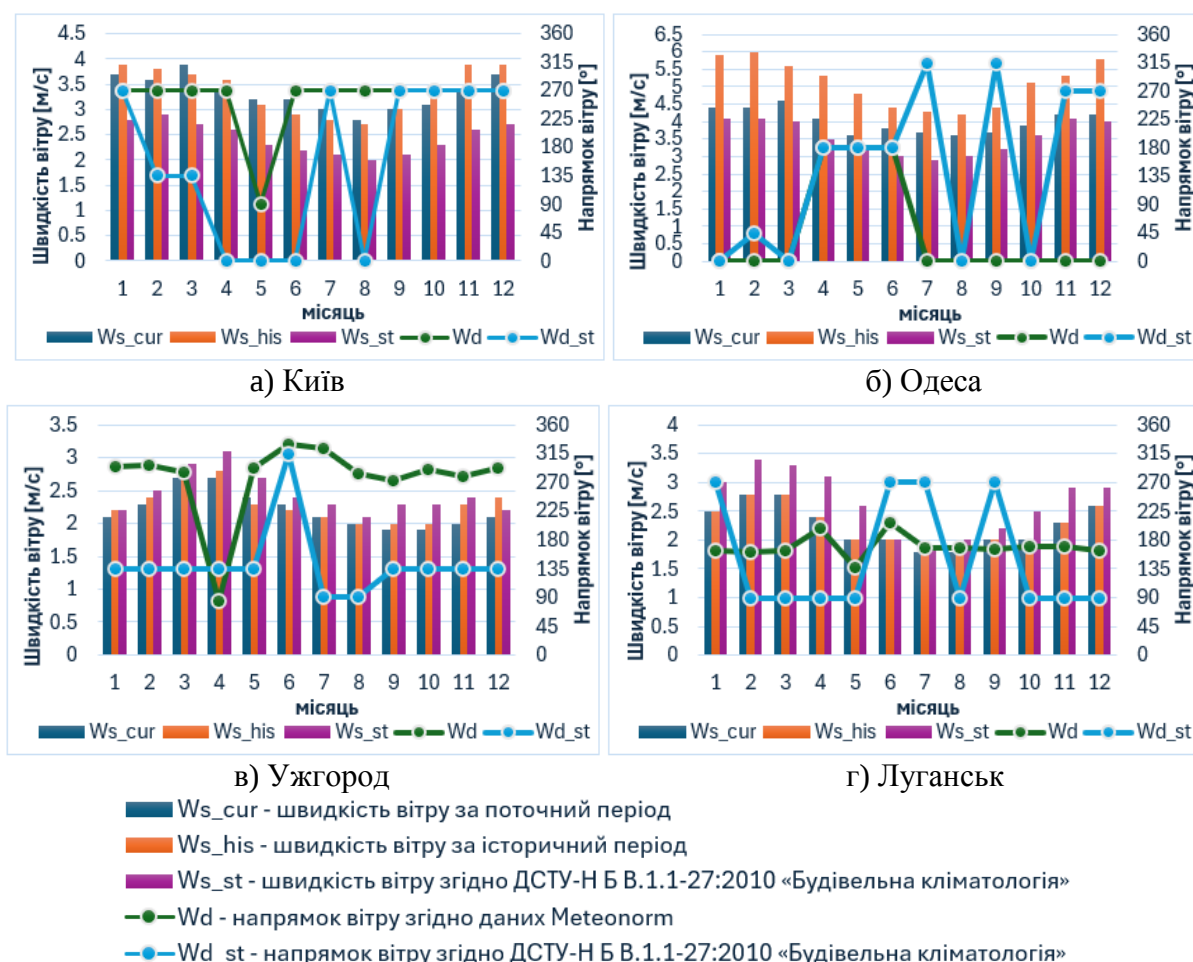


Рисунок 2 – Помісячна зміна швидкості та напрямку вітру для різних міст за поточний період, історичні дані та відповідно до ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія»

Результати аналізу свідчать про відсутність глобальної закономірності щодо збільшення чи зменшення швидкості вітру з часом на території України, для кожного міста ці зміни індивідуальні. Наприклад, для міста Києва спостерігається, що в наш час

середньомісячна швидкість вітру в середньому на 0,2 м/с зменшилась в порівнянні з історичний періодом, проте на 0,9 м/с більша за значення наведені в ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» [9]. Для Одеси швидкість вітру за поточний період досить близька до нормативних значень, але в середньому за рік швидкість вітру за поточний період зменшилась на 1,1 м/с в порівнянні з історичними даними. Для міста Ужгород статистичні дані за поточний та історичний період не підходять до нормативних значень більше ніж на 0,4 м/с. В Луганську, згідно даним з бази даних Meteororm [10], середньомісячна швидкість вітру з часом не змінилась, і в порівнянні з нормативними значеннями різняться на 0,0–0,7 м/с для різних місяців.

Згідно середньомісячним даним з бази даних Meteororm [10], для міст Києва, Харкова, Вінниці, Хмельницького, Полтави, Житомира, Черкас та Кропивницького характерним є західний (окрім травня місяця) напрямок вітру. Для усіх інших обласних центрів України графіки зміни середньомісячного напрямку вітру різняться між собою.

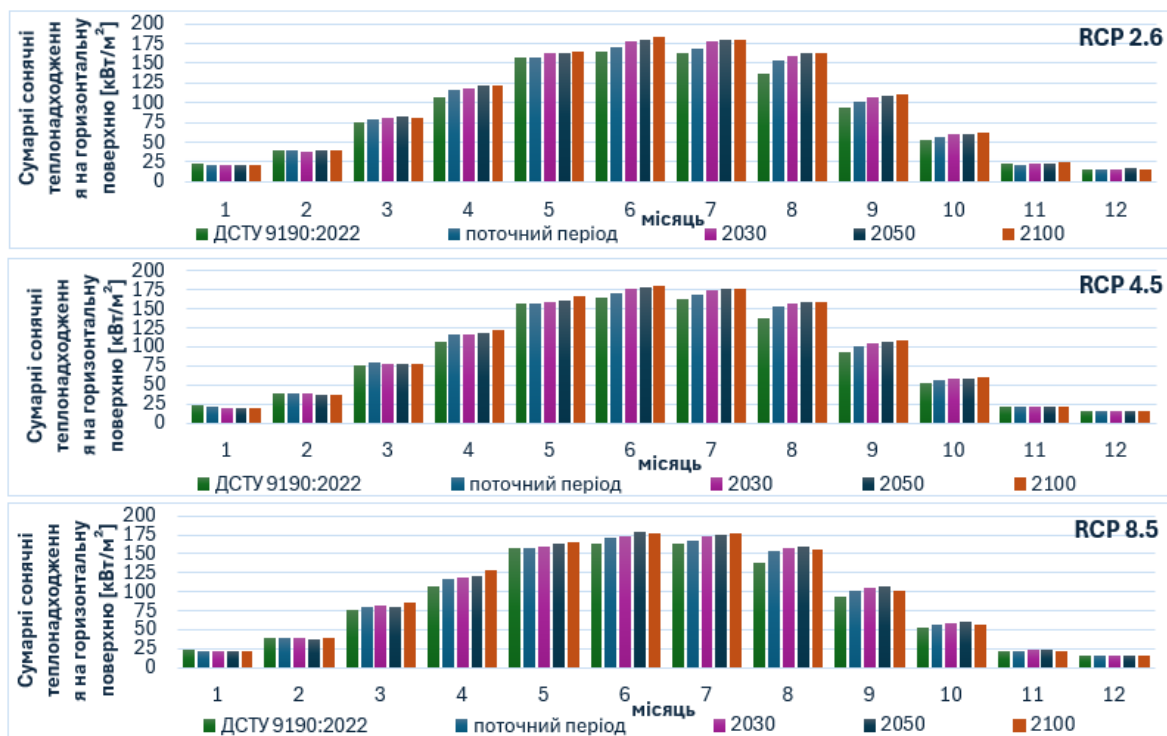
Аналіз поточних, нормативних та майбутніх кліматичних даних

У кліматичній базі даних Meteororm [10] доступні детальні помісячні та погодинні метеорологічні дані для трьох глобальних сценаріїв зміни клімату – RCP 2.6, RCP 4.5 та RCP 8.5. Ці сценарії відображають різні варіанти розвитку подій залежно від рівня викидів парникових газів у майбутньому та використовуються для моделювання кліматичних умов у ХХІ столітті. У межах цього дослідження проведено детальний аналіз кліматичних характеристик відповідно до зазначених сценаріїв для двох міст, що репрезентують різні кліматичні зони України: Києва (І зона) та Одеси (ІІ зона) [9].

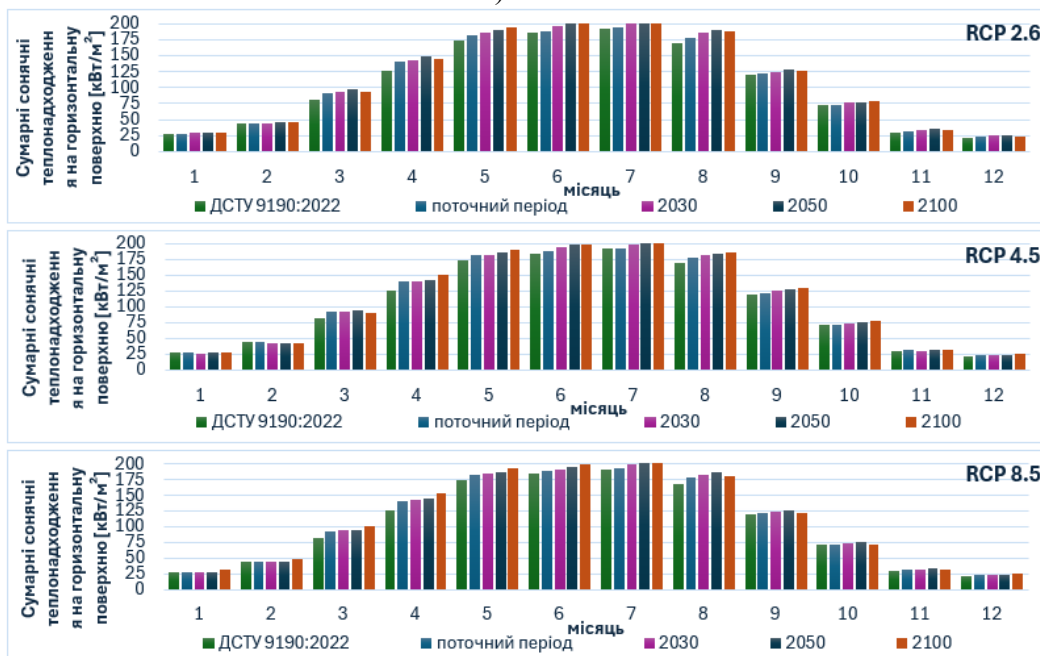
На рис. 3 зображено помісячну зміну сумарної енергії сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню для міста Київ та Одеси за поточний період, згідно даних ДСТУ 9190:2022 [8] та відповідно до різних RCP. Дані середньомісячної сумарної сонячної радіації, усереднених для однієї години, що надходять на горизонтальну поверхню за ДСТУ 9190:2022 [8] були перераховані в сонячну енергію за певний період часу, яка надходить на горизонтальну поверхню для подальшого співставлення з даними з Meteororm [10]. Середньорічна різниця в сумарних сонячних теплонадходженнях на горизонтальну поверхню між поточним періодом та нормативними значеннями з ДСТУ 9190:2022 [8] для Києва та Одеси становить 4 %. Згідно прогнозів Meteororm [10] в період 2020–2100 років кількість сонячних теплонадходжень буде збільшуватись. Наприклад для міста Київ за сценарієм RCP 2.6 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 4,3 % у 2030 році, на 5,7 % у 2050 році та на 6,5 % у 2100 році. За сценарієм RCP 4.5 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 1,8 % у 2030 році, на 2,8 % у 2050 році та на 4,3 % у 2100 році. За сценарієм RCP 8.5 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 2,7 % у 2030 році, на 3,8 % у 2050 році та на 4,5 % у 2100 році.

Для Одеси за сценарієм RCP 2.6 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 3,4 % у 2030 році, на 5,7 % у 2050 році та на 5,7 % у 2100 році. За сценарієм RCP 4.5 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 1,2 % у 2030 році, на 3,1 % у 2050 році та на 4,9 % у 2100 році. За сценарієм RCP 8.5 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 2,0 % у 2030 році, на 3,5 % у 2050 році та на 5,2 % у 2100 році.

Таким чином, у разі реалізації будь якого сценарію RCP, для обох міст прогнозується стабільне зростання GHI. Найбільше зростання для обох міст в майбутньому буде за сценарієм RCP 2.6, трохи менше за RCP 8.5 і найповільніше за RCP 4.5.



а) Київ



б) Одеса

Рисунок 3 – Помісячна зміна сумарної енергії сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню для міст (а) Києва та (б) Одеси за поточний період, відповідно до DSTU 9190:2022 та відповідно до різних RCP

З аналізу погодинних кліматичних даних про напрямки вітру з бази даних Meteonorm [10] для 25 міст України за поточний та історичний період територію України можна поділити на 4 регіони (рис. 4) з однаковими погодинними значеннями напрямків вітру, які наведені на рис. 5.

Для 1 регіону переважаючими є західний та південно-західний напрямки вітру, для 2 – західний та північно-західний, для 3 – західний, а для 4 – західний, північно-західний та північний.

Згідно даних з бази даних Meteonorm [10] за поточний та історичний періоди, а також за 2030, 2050, 2070, 20190, 2100 роки погодинні напрямки вітру є однаковими, також погодинні напрямки вітру є однаковими за 2020, 2040, 2060 та 2080 для міст Києва та Одеси для усіх RCP. Між собою ці дві групи відрізняються на 12–76 годин для Києва та на 2–146 годин для Одеси за різними напрямками в річному розрізі, що в цілому не впливає на визначення переважаючого напрямку вітру.

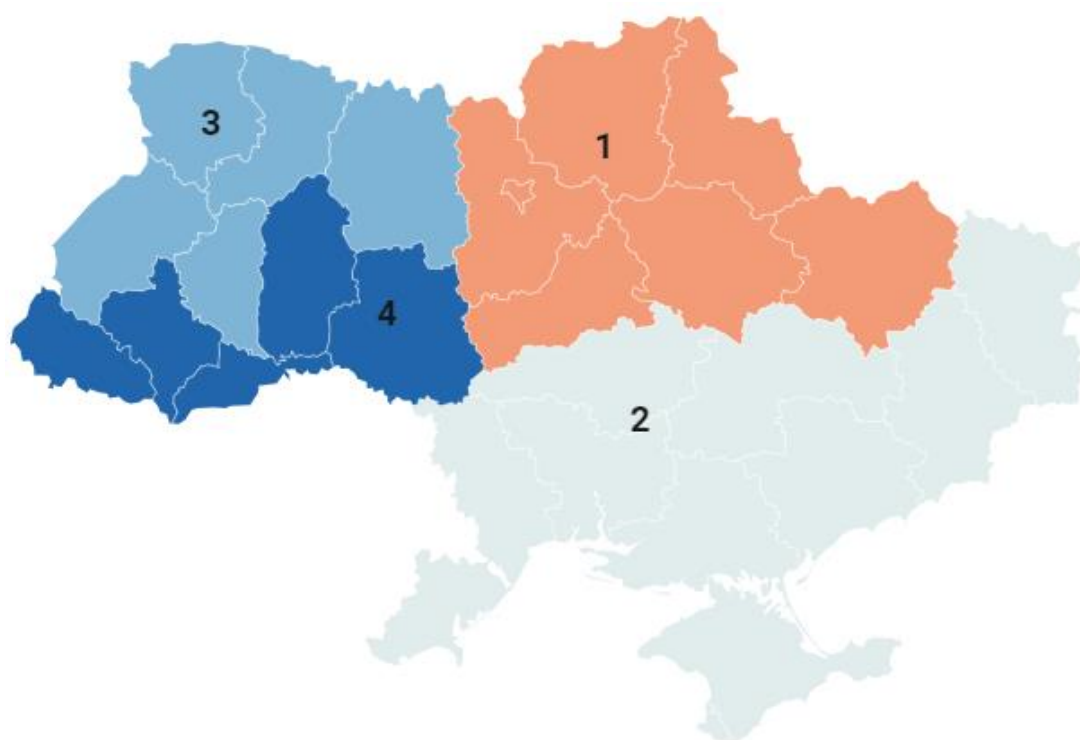


Рисунок 4 – Класифікація регіонів України за переважними напрямками вітру

Як і при аналізі помісячних даних, так і при аналізі погодинних даних швидкості вітру для різних міст за історичний та поточний періоди, встановлено, що для деяких міст, таких як Вінниця, Луцьк, Дніпро, Запоріжжя, Івано-Франківськ та ряду інших міст характерним є збільшення кількості годин з сильнішим вітром. І навпаки, для міст: Київ, Одеса, Харків, Полтава, Житомир та ряду інших міст характерним є збільшення годин зі слабким вітром.

Особливістю кліматологічної бази даних Meteonorm [10] є те, що напрямки та швидкості вітру для січня місяця є однаковими за історичний, поточний періоди, 2020–2100 роки для усіх RCP, і лише починаючи з лютого місяця дані починають різнитися. Згідно опрацьованих погодинних даних за рік, різниця між поточними значеннями кількості годин з певною швидкістю вітру в діапазоні 0–10 м/с та між прогнозованими значеннями може сягати 10 % (RCP 2.6) – 12 % (RCP 8.5), проте середньорічне

значення залишилось незмінним і однаковим з поточного періоду і до 2100 року за різними RCP на рівні 3,3 м/с для Києва і 4,0 м/с для Одеси.



Рисунок 5 – Погодинні напрямки вітру для регіонів України

Екстремальні погодні умови

GHI є фундаментальним параметром при оцінюванні ефективності та надійності роботи фотоелектричних систем, особливо в контексті екстремальних кліматичних умов. Високі значення максимальної годинної сонячної радіації можуть призводити до появи явищ перевипромінювання (overirradiance events) – перевищення проєктних умов роботи фотоелектричних установок, що спричиняє ризики перегріву, втрати ефективності або нестабільної роботи інверторів.

На рис. 6 наведено результати аналізу погодинної зміни сонячної радіації протягом року для горизонтальної поверхні протягом року. Для цього були визначені максимальні значення для кожної доби та встановлено максимально можливий рівень середньогодинного добового випромінювання для 25 міст України за поточний кліматичний період (1996–2015) та для історичного періоду (1961–1990). З рисунку видно наявність суттєвого регіонального розкиду значень, що вказує на неоднорідність сонячного потенціалу в межах території країни.

Загалом, отримані результати підтверджують актуальність регіонально специфічного підходу до планування сонячних енергетичних об'єктів. Так, у містах Луцьк, Ужгород, Полтава спостерігається зниження максимальних значень GHI, в той час в Запоріжжі, Тернополі, Івано-Франківську, Житомирі відбулось зростання пікових значень, що вказує на необхідність врахування ризиків перевантаження систем і впровадження технологічних рішень для захисту обладнання від overirradiance-навантажень.

Для фотоелектричних систем явища перевипромінювання можуть бути критичними, оскільки створюють непередбачувані стрибки напруги, струму і температури, що перевантажують обладнання.

Згідно аналізу погодинних даних за історичний, поточний період та для сценаріїв RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 для міст Києва та Одеси, номінальні середньогодинні

максимуми ГНІ в Україні за ясного неба знаходяться у межах 954–1070 Вт/м² для Одеси, 923–1042 Вт/м² для Києва, що в годинному проміжку не перевищує порогових значень > 1100 Вт/м² [12].

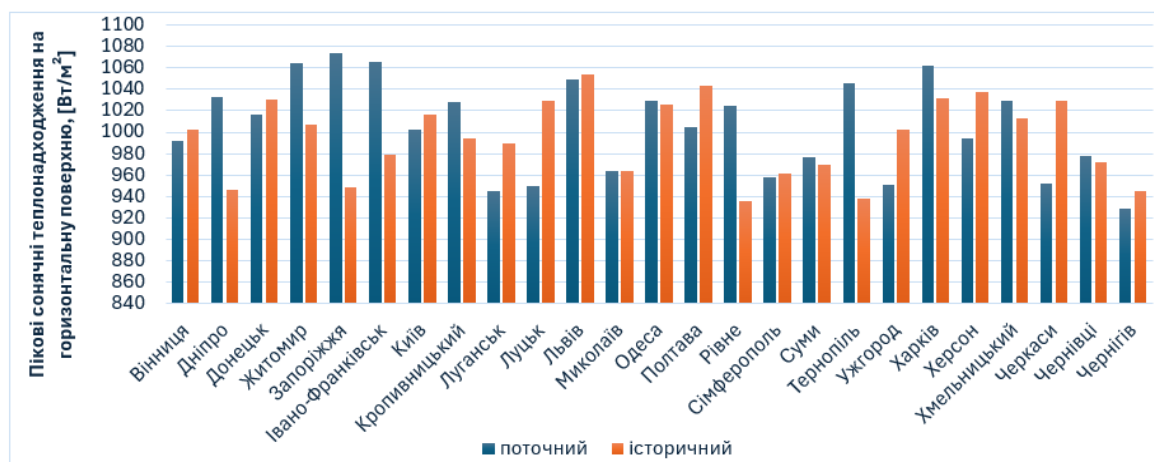


Рисунок 6 – Максимальне середньогодинне сонячне випромінювання ГНІ для міст України

За шкалою Бофорта вітер швидкістю 10,8–13,8 м/с вважається сильним, при 17,2–20,7 м/с ламаються гілки дерев, а від 20,8 м/с починаються штормові руйнівні наслідки. Хоча пориви вітру бувають короткочасні і можуть перевищувати 17,2 м/с та спричиняти руйнівні наслідки.

Міста, де за поточний період часу переважають легкі вітри (0–5,0 м/с) понад 85 % часу за рік – це Житомир, Луганськ, Ужгород, Івано-Франківськ, Черкаси та Полтава. Помірний вітер (5,1–10,0 м/с) найбільше зустрічаються в Сімферополі (30,7 %), Дніпрі (28,8 %), Одесі (27,41 %) та Донецьку (27,41 %). Сильний вітер зі швидкістю 10,1–15,0 м/с найчастіше зустрічається в Сімферополі (868 годин/рік), Дніпрі (199 годин/рік) та Рівному (182 годин/рік). Дуже сильні вітри (15,1–17,0 м/с) зустрічаються в Сімферополі (81 годин/рік), Черкасах (67 годин/рік) та Ужгороді (65 годин/рік). Вітри зі швидкістю понад 17 м/с за поточний період зафіксовані лише у Сімферополі (14 годин/рік).

На підставі погодинного розподілу швидкостей вітру, територію України слід віднести до вітрового класу III або IV за стандартом ДСТУ EN ІЕС 61400-1:2022 [13], що застосовується до проектування вітротурбін. Низька частота сильних вітрів, максимальні значення по Україні, за винятком Сімферополя (20,4 м/с) становлять 13,5–16,8 м/с і переважання слабких режимів (до 5 м/с у 79 % часу по Україні) свідчить про обмежену вітроенергетичну доцільність і мінімальний ризик для конструкцій з точки зору вітрового навантаження.

На основі сценаріїв кліматичних змін RCP 2.6, RCP 4.5 та RCP 8.5 для міст Києва та Одеси (рис. 7) проаналізовано прогнозовану кількість годин із сильним вітром у діапазоні 10,1–16,0 м/с до 2100 року.

Результати показують, що незалежно від сценарію більшість значень кількості годин із такими швидкостями вітру залишаються стабільними або змінюються незначно: у межах 75–87 год/рік для Києва та 169–185 год/рік для Одеси. У сценарії RCP 2.6 простерігається тенденція до поступової стабілізації вітрових умов, у той час як у RCP 4.5 можливе незначне зростання тривалості сильного вітру в середині століття.



Рисунок 7 – Погодинні напрямки вітру для регіонів України

Найбільша варіативність спостерігається в сценарії RCP 8.5. За цим сценарієм, попри загалом помірну кількість годин сильного вітру, наявні періодичні коливання, що свідчать про ймовірну зростаючу нестабільність атмосферних процесів. Водночас вітри понад 14 м/с залишаються рідкісними – до 6 разів/рік або рідше для Одеси та раз на рік для Києва або відсутні взагалі по усіх сценаріях і не мають тенденції до зростання.

Загалом, вітрові умови у довгостроковій перспективі залишатимуться переважно безпечними, з незначними змінами, що не впливають суттєво на будівельну безпеку або вітроенергетичну доцільність.

Висновки

За результатами аналізу – річна кількість сонячних теплонадходжень за поточний період в середньому для І температурної зони більша ніж прераховані значення на основі даних з ДСТУ 9190:2022 на 153 (кВт·год/м²), а для ІІ температурної зони більша на 131 (кВт·год/м²). Згідно аналізу погодинних даних GHI з кліматичної бази даних Meteororm для міст Києва та Одеси за різними сценаріями зміни клімату, до 2100 року кількість сонячних теплонадходжень буде зростати. Найбільше зростання GHI для обох міст в майбутньому буде за сценарієм RCP 2.6, трохи менше за RCP 8.5 і найповільніше за RCP 4.5. За результатами досліджень, середньогодинні максимуми GHI в Києві та Одесі не перевищують критичного порогу в 1100 Вт/м.

З аналізу помісячних статистичних даних з бази Meteororm за поточні та історичні періоди, напрямки вітру залишаються незмінними, тоді як швидкість вітру варіюється. При цьому не спостерігається загальної тенденції до збільшення чи зменшення швидкості вітру з часом на території України, оскільки ці зміни є різними для кожного міста. Різниця з нормативних значень та відповідно ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» також є різною для кожного міста.

З аналізу погодинних значень напрямків вітру за поточний період було виділено 4 регіони з однаковими погодинними значеннями напрямків вітру. Для 1 регіону переважаючими є західний та південно-західний напрямки вітру, для 2 – західний та північно-західний, для 3 – західний, а для 4 – західний, північно-західний та північний.

Прогнозована динаміка вітрових режимів до 2100 року за сценаріями RCP 2.6, RCP 4.5 та RCP 8.5 не демонструє суттєвого зростання екстремальних значень. Таким чином, вітрові навантаження залишаються на контрольованому рівні, що дозволяє вважати їх несуттєвим обмежувальним фактором для розвитку сонячної енергетики.

Література

1. Yang Y., Javanroodi K., Nik V. Climate change and renewable energy generation in Europe – long-term impact assessment on solar and wind energy using high-resolution future climate data and considering climate uncertainties. *Energies*. 2022. Vol. 15. DOI: 10.3390/en15010302.
2. Shanbhag S. S., Dixit M. K. A review of evolving climate and energy economy trends to enhance the dynamic life cycle assessment of buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2024. Vol. 111. P. 105560. – ISSN 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105560.
3. Рибченко Л. С., Савчук С. В., Тимофеев В. Є., Щеглов О. А. Динаміка фотосинтетично активної радіації за 1986–2015 рр. в Україні. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 2022. С. 12–23. DOI: 10.31481/uhmj.30.2022.02.

4. Davy R., Gnatiuk N., Pettersson L., Bobylev L. Climate change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 1652–1659. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.253.

5. Tryhuba A., Bashynsky O., Garasymchuk I., Gorbovy O., Vilchinska D., Dubik V. Research of the variable natural potential of the wind and energy in the northern strip of the Ukrainian Carpathians. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 154. P. 06002. DOI: 10.1051/e3sconf/202015406002.

6. Kozarcanin S., Liu H., Andresen G. B. 21st century climate change impacts on key properties of a large-scale renewable-based electricity system. *Joule*. 2019. DOI: 10.1016/j.joule.2019.02.001.

7. IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report – Summary for Policymakers*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. 34 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf (дата звернення: 25.06.2025).

8. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. На заміну ДСТУ Б А.2.2-12:2015 ; чинний від 2023-03-01. Вид. офіц. Київ, 2022. 156 с.

9. ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. На заміну СНиП 2.01.01-82 і таблиці 2 ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 ; чинний від 2011-11-01. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 127 с.

10. Довідник. Частина I: Програмне забезпечення. *Meteonorm 8. Дані про опромінення для кожного місяця на Землі*. URL: https://meteonorm.com/assets/downloads/mn82_software (дата звернення: 03.12.2024).

11. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Суходуб І. О., Гетманчук Г. О., Крамаренко С. О. Аналіз зміни зовнішньої температури повітря регіонів України зі спеціальним фокусом на можливих екстремальних умовах. *Технології та інжиніринг*. 2024. № 5. С. 45–56. DOI: 10.30857/2786-5371.2024.5.5.

12. Chase O. A., Teles M. B., De Jesus dos Santos Rodrigues M., De Almeida J. F. S., Macêdo W. N., Da Costa Junior C. T. A low-cost, stand-alone sensory platform for monitoring extreme solar overirradiance events. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 8. P. 2685. DOI: 10.3390/s18082685.

13. ДСТУ EN ІЕС 61400-1:2022. Системи виробництва енергії вітру. Частина 1. Вимоги до проектування (EN ІЕС 61400-1:2019, IDT; ІЕС 61400-1:2019, IDT). На заміну ДСТУ ІЕС 61400-1:2001 ; чинний від 31.12.2023. ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2022.

Bibliography (transliterated)

1. Yang Y., Javanroodi K., Nik V. Climate change and renewable energy generation in Europe – long-term impact assessment on solar and wind energy using high-resolution future climate data and considering climate uncertainties. *Energies*. 2022. Vol. 15. DOI: 10.3390/en15010302.

2. Shanbhag S. S., Dixit M. K. A review of evolving climate and energy economy trends to enhance the dynamic life cycle assessment of buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2024. Vol. 111. P. 105560. ISSN 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105560.
3. Rybchenko L. S., Savchuk S. V., Tymofieiev V. Ye., Shcheglov O. A. Dynamika fotosyntetychno aktyvnoi radiatsii za 1986–2015 rr. v Ukraini. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 2022. P. 12–23. DOI: 10.31481/uhmj.30.2022.02.
4. Davy R., Gnatiuk N., Pettersson L., Bobylev L. Climate change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 1652–1659. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.253.
5. Tryhuba A., Bashynsky O., Garasymchuk I., Gorbovy O., Vilchinska D., Dubik V. Research of the variable natural potential of the wind and energy in the northern strip of the Ukrainian Carpathians. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 154. P. 06002. DOI: 10.1051/e3sconf/202015406002.
6. Kozarcenin S., Liu H., Andresen G. B. 21st century climate change impacts on key properties of a large-scale renewable-based electricity system. *Joule*. 2019. DOI: 10.1016/j.joule.2019.02.001.
7. IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report – Summary for Policymakers*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. 34 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf (data zvernennia: 25.06.2025).
8. DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pid chas opalennia, okholodzhennia, ventyliatsii, osvitylennia ta hariachoho vodopostachannia. Na zaminu DSTU B A.2.2-12:2015 ; chynnyi vid 2023-03-01. Vyd. ofits. Kyiv, 2022. 156 p.
9. DSTU-N B V.1.1–27:2010. Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivelna klimatolohiia. Na zaminu SNyP 2.01.01-82 i tablytsi 2 DSTU-N B A.2.2-5:2007 ; chynnyi vid 2011-11-01. Vyd. ofits. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 127 p.
10. Dovidnyk. Chastyna I: Prohramne zabezpechennia. Meteonorm 8. Dani pro oprominennia dlia kozhnoho mistia na Zemli. URL: https://meteonorm.com/assets/downloads/mn82_software (data zvernennia: 03.12.2024).
11. Deshko V. I., Bilous I. Yu., Sukhodub I. O., Hetmanchuk H. O., Kramarenko S. O. Analiz zminy zovnishnoi temperatury povitria rehioniv Ukrainy zi spetsialnym fokusom na mozhlyvykh ekstremalnykh umovakh. *Tekhnolohii ta inzhynirinh*. 2024. No. 5. P. 45–56. DOI: 10.30857/2786-5371.2024.5.5.
12. Chase O. A., Teles M. B., De Jesus dos Santos Rodrigues M., De Almeida J. F. S., Macêdo W. N., Da Costa Junior C. T. A low-cost, stand-alone sensory platform for monitoring extreme solar overirradiance events. *Sensors*. 2018. Vol. 18, №8. P. 2685. DOI: 10.3390/s18082685.
13. DSTU EN IEC 61400-1:2022. Systemy vyrobnytstva enerhii vitru. Chastyna 1. Vymohy do proiektuvannia (EN IEC 61400-1:2019, IDT; IEC 61400-1:2019, IDT). Na zaminu DSTU IEC 61400-1:2001 ; chynnyi vid 31.12.2023. DP «Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» (DP «UkrNDNTs»), 2022.

УДК 697.132

В. І. Дешко^{1,2}, д-р техн. наук, професор, І. Ю. Білоус^{1,3}, канд. техн. наук, доцент,
І. О. Суходуб¹, канд. техн. наук, доцент, Г. О. Гетманчук¹, наук. співроб.,
С. О. Крамаренко¹, аспірант, А. В. Гавриш¹, аспірант

АНАЛІЗ ЗМІН СОНЯЧНИХ ТЕПЛОНАДХОДЖЕНЬ І ВІТРОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК У РЕГІОНАХ УКРАЇНИ З ФОКУСОМ НА ЕКСТРЕМАЛЬНІ КЛІМАТИЧНІ УМОВИ

Метою цієї роботи є аналіз змін сонячних теплонадходжень і вітрових характеристик у різних регіонах України на основі історичних, поточних і прогнозованих даних для оцінки потенціалу використання ВДЕ, з урахуванням викликів, пов'язаних з екстремальними кліматичними умовами та потребами в децентралізованому енергозабезпеченні.

Методика включає використання методів синтезу та аналізу кліматичних даних.

Результати включають аналіз та порівняння метеорологічних даних з глобальної кліматичної бази Meteonorm, нормативних показників за ДСТУ 9190:2022, а також кліматичних сценаріїв RCP (2.6, 4.5, 8.5). У цьому дослідженні проаналізовано зміну сонячних теплонадходжень та вітрових характеристик у різних регіонах України. Аналіз здійснено на основі історичних кліматичних даних, метеорологічних даних з бази Meteonorm, нормативних показників за ДСТУ 9190:2022, а також прогнозів відповідно до сценаріїв RCP, що враховують різні рівні глобального потепління.

Встановлено, що для більшості регіонів поточні значення річних сонячних надходжень перевищують нормативні, також у всіх сценаріях кліматичних змін для міст Одеса та Київ передбачається подальше зростання сонячних теплонадходжень на горизонтальну поверхню (GHI) до 2100 року. Середньогодинні максимуми GHI у 25 містах України не перевищують критичного порогу в 1100 Вт/м², проте варто враховувати, що миттєві значення можуть мати більшу величину.

З аналізу погодинних значень напрямків вітру за поточний період було виділено 4 регіони з однаковими погодинними значеннями напрямків вітру. Для 1 регіону переважаючими є західний та південно-західний напрямки вітру, для 2 - західний та північно-західний, для 3 – західний, а для 4 – західний, північно-західний та північний. Встановлено, що для території України характерною є низька частота сильних вітрів, максимальні значення по Україні, становлять 13,5–16,8 м/с. Переважання слабких режимів (до 5 м/с у 79 % часу по Україні) свідчить про обмежену вітроенергетичну доцільність і мінімальний ризик для конструкцій з точки зору вітрового навантаження. Прогнозована динаміка вітрових режимів для міст Києва та Одеси до 2100 року за сценаріями RCP 2.6, RCP 4.5 та RCP 8.5 не демонструє суттєвого зростання екстремальних значень.

Наукова новизна полягає у комплексному порівнянні міжнародних та національних кліматологічних показників GHI та вітрових характеристик у часовій та просторовій динаміці, з урахуванням ризиків, що виникають внаслідок можливих екстремальних погодних умов.

Практична значимість полягає у можливості врахування регіональних кліматичних відмінностей при проектуванні децентралізованих систем енергозабезпечення з використанням ВДЕ на основі історичного, поточного та майбутніх сценаріїв змін клімату.

Ключові слова: кліматичні данні, Meteonorm, GHI, екстремальні погодні умови, швидкість вітру, відновлювані джерела енергії.

V. I. Deshko, I. Y. Bilous, I. O. Sukhodub, H. O. Hetmanchuk, S. O. Kramarenko,
A. V. Gavrysh

ANALYSIS OF CHANGES IN SOLAR HEAT INCREASES AND WIND CHARACTERISTICS IN REGIONS OF UKRAINE WITH A FOCUS ON EXTREME CLIMATE CONDITIONS

The purpose of the article is to analyze changes in solar heat gains and wind characteristics across various regions of Ukraine based on historical, current, and projected data, in order to assess the potential for using renewable energy sources (RES), considering the challenges associated with extreme climatic conditions and the need for decentralized energy supply.

The methodology includes the application of synthesis and analysis methods for climatic data.

Findings an analysis and comparison of meteorological data from the global Meteonorm climate database, normative indicators according to DSTU 9190:2022, as well as climate scenarios RCP (2.6, 4.5, 8.5). This study analyzes the changes in solar radiation gains and wind characteristics across different regions of Ukraine, based on historical climatic data, Meteonorm meteorological data, national standards, and climate projections reflecting various levels of global warming.

It was found that for most regions, current annual solar radiation values exceed the normative ones. Moreover, under all climate change scenarios for the cities of Odesa and Kyiv, a further increase in the global horizontal irradiance (GHI) is expected by 2100. The average hourly GHI maxima in 25 Ukrainian cities do not exceed the critical threshold of 1100 W/m²; however, potentially hazardous overirradiance events may occur at shorter (minute-scale) intervals and require further investigation.

Based on the analysis of hourly wind direction data for the current period, four regions with similar prevailing wind directions were identified. In Region 1, the dominant wind directions are western and south-western; in Region 2 – western and north-western; in Region 3 – western; and in Region 4 – western, north-western, and northern. It was established that the territory of Ukraine is characterized by a low frequency of strong winds, with maximum wind speeds ranging from 13.5 to 16.8 m/s. The predominance of light winds (up to 5 m/s for 79 % of the time) indicates limited wind energy feasibility and minimal structural risk in terms of wind loads. The projected wind regime dynamics for Kyiv and Odesa up to 2100 under RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenarios do not show a significant increase in extreme values.

Originality is found in the comprehensive comparison of climatic and normative GHI values and wind characteristics across temporal and spatial scales, with consideration of risks arising from potential extreme weather events.

The practical value of the research results lies in the ability to account for regional climatic differences when designing decentralized energy systems based on renewable energy sources (RES), taking into account historical, current, and future climate change scenarios.

Keywords: climate data, Meteonorm, GHI, extreme weather conditions, wind speed, renewable energy sources.

Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор, К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор,
І. Б. Рябова, канд. техн. наук, професор, Е. Р. Нагорний, аспірант,
І. В. Пільник, аспірант, В. Г. Рись, аспірант

ВИМІРЮВАННЯ ТА НАДІЙНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА ЕКСЕРГІЇ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: вимірювання, надійність, виробництво ексергії, довкілля, оточення системи, різниця потенціалів, інженерна позиція, потоки енергії, потоки речовин, енергетичні баланси, ексергетичний баланс, оцінка придатності, температурний потенціал енергії, газові котли, електричні водонагрівачі, геотермальні, ґрунтові теплові насоси, вітроелектрогенератори, джерела ресурсів, мінеральна сировина, паливо, геотермальні води, сонячне випромінювання, джерела енергії, ексергетичний метод розрахунку, термодинамічні методи розрахунку, акумулювання, акумулятори постійного струму.

Постановка задачі. Класичний апарат термодинамічних методів розрахунку часто виявляється недостатнім для вирішення нових завдань, пов'язаних з переробкою речовини та енергії. Необхідно не тільки його розвиток, а й поєднання з елементами системного підходу та економіки.

Під впливом цих вимог був розроблений ексергетичний метод розрахунку [1]. Його основна ідея полягає у введенні поряд із загальним, фундаментальним поняттям енергії, додаткового показника – ексергії, який дозволяє врахувати той факт, що енергія в залежності від зовнішніх умов може мати різну цінність для практичного використання (наприклад, одна і та ж кількість теплоти при різному температурному потенціалі джерел).

Розрахунки енергетичних балансів та різних характеристик технічних систем з урахуванням ексергії дають можливість найбільш просто та наочно вирішувати безліч наукових, технічних та техніко-економічних завдань. Вони допомагають виключити помилки, що часто зустрічаються, пов'язані з ігноруванням якісної сторони енергетичних перетворень [2].

Для технічних і техніко-економічних додатків термодинаміки важливо враховувати не тільки процеси всередині системи, а й усі можливі види взаємодії потоків енергії та робочих тіл, пов'язані з аналізованою системою, поза межами. Тільки так можна дати повну інженерну оцінку придатності та корисності всіх потоків енергії або речовини за даних параметрів і на її основі зробити аналіз технічної системи з позицій енергетики та економіки [3].

Отже, загальне уявлення про оточення системи як про все те, що знаходиться за її межами, у цьому випадку недостатньо і має бути розвинене більш детально відповідно до реальних умов роботи систем. Перш за все, необхідно виділити ту частину оточення системи, в якій немає істотних з інженерних позицій різниць потенціалів. Ця "рівноважна" (а точніше, квазірівноважна) частина оточення, яка сама по собі не може служити джерелом роботи будь-якого виду, називається навколишнім середовищем.

Таким чином, вимірювання та надійність виробництва ексергії в енергетичних установках, використовуваних для різних умов роботи, є актуальними завданнями.

Мета статті. На прикладі енергетичної установки показати ефективність вимірювання та надійності виробництва ексергії. У прототипі енергетичної установки застосовується: газовий котел. А в новій енергетичній установці використовується: електричний водонагрівач, геотермальний ґрунтовий тепловий насос "ґрунт-вода" і вітроелектрогенератор [4].

В статті доквіллям є атмосфера. Параметри доквілля приймаємо постійними.

Поряд з навколишнім середовищем в оточенні системи можуть знаходитися об'єкти, що відрізняються від рівноважної частини тими або іншими параметрами (наприклад, температурою, тиском, хімічним потенціалом) і здатні служити джерелами речовини і енергії (або – джерелами ресурсів) для аналізованої системи (поклади мінеральної сировини, палива, геотермальні води, сонячне випромінювання). Джерелами енергії в рамках нашої статті є газовий котел, електричний водонагрівач, геотермальний ґрунтовий тепловий насос "ґрунт-вода" і вітроелектрогенератор.

Обчислення, пов'язані як з джерелами речовини та енергії, так і з системою, що аналізується, проводимо відносно частини оточення системи, що перебуває в рівновазі, тобто доквілля. Вона виконує роль референтного рівня ексергії [5]. В якості референтного рівня на практиці використовується конкретне, так зване локальне середовище. Наприклад, в нашій енергетичній установці для обігріву використовується прісна вода, тому ми вважаємо її базовим рівнем ексергії.

Для "живлення" системи та забезпечення її безперервної роботи використовуються вітроелектрогенератор, електричний водонагрівач та геотермальний тепловий насос "ґрунт-вода". Комбінація зазначених джерел і навколишнього середовища становить середовище, на яке впливає система, що нами розглядається.

Процеси зміни стану енергії та речовини, які обумовлюють функціонування технологічних процесів, можуть бути пов'язані з енергією різного типу. Попри їхню схожість, є також обмеження на можливість перетворення одного виду енергії в інший, пов'язані з другим початком термодинаміки. Ці межі є вкрай важливими для практики, всі типи енергоносіїв поділено на дві групи за ступенем їхньої перетворюваності. Перша група містить види енергії, які можуть бути повністю перетворені в будь-який інший вид енергії без обмежень, а друга група включає ті види енергії, котрі повністю не можуть бути перетворені в жоден інший вид енергії [6, 7].

Типи енергії першої групи володіють ентропією, що дорівнює нулю ($S = 0$), іншими словами, їм не властива ентропія. Енергія такого типу іноді називається "організованою" або "безентропійною". Типи ж енергії другої групи мають ентропію, відмінну від нуля ($S > 0$), тобто їм властива ентропія, і енергія цих типів називається "неорганізованою" або "ентропійною".

За другим законом термодинаміки, тільки такі процеси перетворення енергії можуть відбуватися в системі, при яких сумарна ентропія залучених тіл або зростає, або (при зворотних процесах) лишається незмінною. Отже, види "безентропійної" енергії (перша група) можуть здійснювати всі перетворення, бо в кожному випадку ентропія буде або постійною, або збільшуватиметься, але не зменшуватиметься. На противагу цьому, над усіма типами енергій другої групи неможливо здійснити перетворення, які б призводили до зменшення ентропії даної системи. Тобто, дані різновиди не можуть бути повністю перетворені в будь-який вид "безентропійної" енергії.

З технічної точки зору, будь-яка "безентропійна" енергія з необмеженою конвертованістю, як правило, є більш цінною, "кращою" та "ентропійнішою", ніж енергія першої групи, адже будь-яку енергію другої групи можна завжди отримати з енергії першої групи, але не навпаки. Відповідно до коефіцієнту конверсії, в нашому проєкті енергія вітру, тепло від електричного водонагрівача та теплового насоса належать до другої групи [8].

Пряме підсумовування і порівняння окремих типів енергії у другій групі неприйнятне, тому що вони не є додатковими. Окрім енергетичних балансів, де має значення лише кількість енергії. Щоб зробити їх співставними, необхідний уніфікований підхід, який би давав змогу кількісно оцінити енергію, враховуючи її якісні особливості.

Цим єдиним підходом є ексергія – величина роботи, що може бути здійснена за рахунок зовнішнього джерела енергії при термодинамічній взаємодії термодинамічної системи або енергетичного потоку з середовищем до моменту встановлення її повної динамічної рівноваги.

Визначаючи ексергію, слід враховувати, перш за все, власне систему (або потік енергії), виконану роботу зовнішнім приймачем енергії та середовище, в якому знаходиться система. Аналізована ексергетичним методом система може бути простою (наприклад, певне робоче тіло в замкнутому об'ємі або потоці) і складною (велика енергетична, хімічна або інша установка, комплекс установок, індустрія, область, регіон, країна). Проте в кожному випадку слід розглядати ті властивості системи, що дозволяють її представити як термодинамічну. В нашому випадку система є комплексною [9].

Системи бувають закритими (тобто без обміну речовин із навколишнім середовищем та/або об'єктами в ньому), відкритими (з таким обміном), фіксованими (з параметрами, що не змінюються в часі) та нефіксованими. В даному проєкті система є відкритою в частині вітроелектрогенератора, електричного водонагрівача та теплового насоса, а також нестаціонарною [10].

У стані повної рівноваги системи та навколишнього середовища ексергія дорівнює нулю. Цей стан системи називають нульовим або мертвим станом. Робота, яка відповідно до визначення ексергії служить її мірою, не обов'язково є необхідним кінцевим результатом, тобто метою будь-якої аналізованої системи або енергетичного потоку. За сучасних умов результатом такої дії, окрім виконання роботи, можуть бути перетворення і отримання різних речовин, тепла, холоду, випромінювання необхідних параметрів тощо. Тому в визначенні ексергії слово "робота" може бути замінено більш ширшим терміном "енергія, яка не характеризується ентропією". Робота застосовується тільки як міра такої енергії, а не як обов'язкова кінцева мета енергоперетворень. За Першим і Другим принципами термодинаміки, в кожному даному стані ексергія системи, так само як і її енергія, має деяке постійне фіксоване значення, так як зворотний процес узгодження її інтенсивних параметрів з параметрами зовнішнього оточення однозначно описується роботою. Процес взаємодії системи з середовищем може бути як оборотним (ідеальний процес), так і незворотним (реальний процес). Ідеальний процес (за визначенням ексергії) призводить до виконання роботи, що дорівнює ексергії. У разі зупинки процесу до досягнення балансу між параметрами системи і середовища виконана робота дорівнюватиме втраті ексергії системи.

В умовах реального процесу робота є меншою за втрату ексергії (зрештою, робота може дорівнювати нулю), тому що частина ексергії не переходить у роботу, а просто зникає. Це одна з істотних відмінностей між ексергією та енергією. Ексергія підпорядковується закону збереження лише у зворотних процесах, у решті випадків (реальні

системи) може частково або повністю зникнути, втрачатися в результаті дисипації (розсіювання) енергії в необоротних процесах. І чим менша ця зміна ексергії за інших рівних умов, тим більш термодинамічно ідеальним є процес.

Ексергетичний баланс

Рівняння ексергетичного балансу універсально [2] і повністю придатне для будь-яких термодинамічних систем незалежно від видів енергії, які беруть участь у процесі:

$$\sum E' \geq (\sum E'' + \Delta E), \quad (1)$$

$$\sum D = \sum E' - (\sum E'' + \Delta E), \quad (2)$$

де ΔE – збільшення ексергії системи між початковою та кінцевою точками процесу.

Для стаціонарного в часі процесу $\Delta E = 0$ і $\sum D = \sum E' - \sum E''$. Відповідне рівняння енергетичного балансу має вигляд:

$$\sum W' = \sum W'' + \Delta W. \quad (3)$$

Для стаціонарного в часі процесу $\Delta W = 0$. Відповідне рівняння енергетичного балансу має вигляд:

$$\sum W' = \sum W'', \quad (4)$$

де ΔW – збільшення енергії системи між початковою і кінцевою точками процесу.

На відміну від рівняння (3) нерівність (1) і рівняння (2) опираються як на Перший, так і на Другий початки термодинаміки, оскільки вони відбивають ексергетичний баланс системи. Принципова різниця між рівняннями (1) і (3) полягає в тому, що в другому при всіх умовах рівність правої і лівої частин дотримується, а в першому ліва частина в реальних процесах завжди більше правої.

Таким чином, енергетичний баланс по своїй природі не може описати втрати від необоротності процесів у розглянутій системі, тому що незалежно від ступеня її термодинамічної досконалості рівняння (3) буде завжди справедливо. Тому визначення якісних енергетичних характеристик системи по рівнянню (3) проводиться в кожному випадку умовно шляхом виключення із сумарної енергії $\sum W$ тієї частини енергії, яка в даному процесі не використовується (або надходить із навколишнього середовища без витрат).

Ексергетичний баланс, навпаки, у всіх випадках показує втрати від необоротності в системі. Ступінь її термодинамічної досконалості також визначається однозначно відношенням:

$$\frac{\sum E''}{\sum E'} = \frac{\sum E' - \sum D}{\sum E'} = \eta_t. \quad (5)$$

Терміни «втрати енергії» і «втрати ексергії» мають принципово різний зміст. Перший означає втрату енергії не взагалі (енергія зникати, як відомо, не може), а втрату її для даної системи або даної мети, у випадку, якщо частина енергії непридатна для неї

за своєю формою або параметрам. Другий, навпаки, означає, повне зникнення ексергії, тобто її знищення, пов'язане з дисипацією енергії.

На базі основних балансових рівнянь розроблена єдина методика рішення ряду завдань ексергетичного аналізу. Величини $\sum E$ і ΔE у кожному випадку включають ексергію тих видів речовини і енергії, які входять в енергетичний баланс розглянутої системи. Як правило, це ексергія потоку робочого тіла E , ексергія теплового потоку E_q , а також робота L (рівна енергії W для механічної або електричної енергії).

Величина ΔE (у стаціонарних процесах вона дорівнює нулю) визначається збільшенням ексергії речовини в об'ємі.

Методика оптимізації по сумі питомих витрат ексергії

В рамках техніко-економічної модернізації на основі методу ексергії слід брати до уваги час існування технічного об'єкта, а також зміни, що сталися в рамках системи, яка досліджується, з моменту її створення, та зміни, які відбудуться після закінчення її експлуатації. До моменту будівництва в границях перебуває лише зовнішнє оточення. В результаті будівництва об'єкта крізь границі системи починається перетікання ексергії у вигляді потоків речовин та енергії, а після завершення спорудження стає можливим виведення трансформованої ексергії та вихід на стан стаціонарності протягом терміну експлуатації. Врешті-решт, після того, як увесь строк служби відслужено, відбувається демонтаж технічного об'єкту (з частковою регенерацією матеріалів).

Кількісно описану «історію» можна відтворити за рахунок ексергетичного балансу, якщо переходити від витрат ексергії в одиницю часу до їх сумарної величини за увесь період експлуатації технічного об'єкту. Ексергія перетікає через межі технічної системи з паливним потоком $E_{\text{підв}}$, на доставку якого необхідно використати зовнішню ексергію $E_{\text{зовн}}$. Від об'єкта відокремлюються перетворена ексергія $E_{\text{відв}}$ та зовнішні втрати ексергії з відпрацьованими газами. Дані значення беруться для всього строку експлуатації об'єкту $\tau \cdot E$. Від часу прийняття відповідного рішення про будівництво електростанції для отримання електричної чи теплової енергії починається не власне виробництво, а споживання ексергії на виробництво обладнання, виконання будівельних та монтажних робіт. Нерідко такі затрати розпочинаються ще до прийняття рішення про конкретну станцію у зв'язку з виробництвом стандартного обладнання, виплавою металу для нього, будівництвом, а також (за необхідності) заводів з виробництва обладнання.

Процес створення ексергії відбувається лише через декілька наступних років після введення в експлуатацію першого енергоблоку, і продовжується впродовж кількох десятиліть, поки обладнання морально не застаріє або не буде фізично зношене.

До того ж, протягом усього терміну експлуатації теплоелектростанції (ТЕС) енергія витрачається на забезпечення поточних операцій (видобуток і транспортування палива тощо). Такі затрати подібні до власних потреб теплової електростанції, якщо їх розглядати в комплексі з урахуванням вироблення палива.

Підведена ексергія:

$$E_{\text{підв}} = \int_{\tau_c}^{\tau_e} E_{\text{підв}} d\tau. \quad (6)$$

Відведена ексергія:

$$E_{\text{відв}} = \int_0^{\tau_e} E_{\text{відв}} d\tau. \quad (7)$$

Критерієм ефективності служить коефіцієнт ексергії-нетто:

$$K_E = E_{\text{відв}} / E_{\text{стр}}, \quad (8)$$

де $E_{\text{відв}}$ – ексергія, одержувана в одиницю часу; $E_{\text{підв}}$ – витрати ексергії за одиницю часу; τ_e – час виготовлення устаткування і будівництва установки; τ_e – строк експлуатації установки; $\tau_e = 0$ – момент введення в експлуатацію першого агрегату; $E_{\text{стр}}$ – уся ексергія, витрачена на будівництво установки і створення устаткування (не входить ексергія природних енергоресурсів – геотермальної води, палива, і т.п., яка забезпечує після перетворення одержання корисної енергії).

Строк енергетичної окупності, $\tau_{\text{ок}}$ – період часу, протягом якого отримана ексергія компенсує витрачену, – визначається з рівняння (8).

$$\int_0^{\tau_{\text{ок}}} E_{\text{відв}} d\tau = E_{\text{стр}}. \quad (9)$$

За відрізок часу, що пройшов від початку енергетичної окупності до завершення строку експлуатації установки, остання видає ексергію-нетто. Відношення цих величин дає додатковий критерій:

$$K_\tau = \tau_e / \tau_{\text{ок}}. \quad (10)$$

Найбільш ефективним при розрахунку ексергії-нетто вважається такий проект, у якому величини K_E та K_τ максимальні.

Розрахунок ексергії-нетто для будь-якого технічного об'єкта зводиться до наступного:

1. Обчислення підведеного і відведеного потоків вектора щільності потоку ексергії δ_e через поверхню F – границю термодинамічної системи, усередині якої укладений розглянутий об'єкт:

$$E = \iint_F \delta_e \cdot dF \approx \delta_e \cdot F, \quad (11)$$

що завершується розрахунком ексергетичного ККД:

$$\eta_\tau = \frac{E_{\text{відв}}}{E_{\text{підв}}} = 1 - \frac{D}{E_{\text{підв}}}. \quad (12)$$

2. Розрахунок повних витрат ексергії на створення об'єкта

$$E_{\text{стр}} = \sum_i^n M_i \left(\frac{W_{\text{доб}}}{\eta_{\text{доб}}} + \frac{\Delta G}{\eta_{\text{відн}}} + \frac{W_{\text{пр}}}{\eta_{\text{пр}}} \right) + W_{\text{ост}}, \quad (13)$$

де M_i – маса деталі з матеріалу i ; $W_{\text{доб}}$ – теоретично мінімальна робота з руйнування породи і видобутку сировини; $\eta_{\text{доб}}$ – ексергетичний ККД видобутку сировини; ΔG – енергія Гиббса реакції відновлення (металургійного процесу); $\eta_{\text{відн}}$ – ексергетичний ККД процесу відновлення; $W_{\text{пр}}$ – теоретична робота деформації при прокаті; $\eta_{\text{пр}}$ – витрати ексергії на обробку, складання і транспорт усіх елементів розглянутого об'єкта; n – число всіх деталей.

Як правило, $W_{\text{ост}} < 0,2 \cdot E_{\text{стр}}$, і цю величину можна врахувати шляхом уведення коефіцієнта до основного компонента — витратам ексергії на одержання матеріалів.

3. Визначення повної витрати ексергії E за весь термін служби об'єкта τ_e :

$$E = \int_0^{\tau_e} E d\tau \approx E \tau_e. \quad (14)$$

В основі оцінки – вимога обов'язкової економії первинної ексергії (палива) в енергетичному комплексі країни за допомогою застосування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [11]. У розрахунку враховуються поточні витрати палива на кожний з варіантів і витрати на їхнє створення. Оскільки в ряді випадків ВДЕ вимагає додаткового традиційного джерела енергії [12] для одержання гарантованої потужності, допускається поточна витрата палива у ВДЕ в зменшеній кількості [13]. Це враховується як підвищення деякого умовного ККД нового варіанта.

Загальне споживання ексергії для ВДЕ розраховується як сума затрат на видобування і переміщення руди та іншої сировини, металургійні процеси плавлення і прокатки, виробництво пластмас та інших неметалевих матеріалів, виробництво комплектуючих, зварювальних робіт і збірку всього технологічного обладнання, а також на будівництво споруд, будівель і доріг, включаючи житлові селища. Дозволяється приблизний підрахунок використання ексергії як добутку маси кожної з основних матеріалів M на питому енергоємність матеріалу E (МДж/кг або кг у.п./кг).

Витрата ексергії на переробку та збірку врахована з коефіцієнтом, що не перевищує 1,2 для основного енергетичного обладнання (котел, турбіна, генератор). Приблизні величини енергоємності матеріалів E , обрані за графіком з літературних джерел [2].

Рішення про придатність або непридатність проекту ВДЕ до подальшого пророблення ухвалюється залежно від знака нерівності $\tau_{\text{ок}} \geq \tau_{\text{норм}}$ (тут $\tau_{\text{норм}}$ – нормативний строк), де строк енергетичної окупності $\tau_{\text{ок}}$ ВДЕ визначається прирівнюванням сумарних витрат первинної ексергії Π за прототипом (а) і новому (b) варіантам.

$$\Pi = \sum M_a \cdot E_a + \frac{N}{\eta_a} \cdot \tau_{\text{ок}} = \sum M_b \cdot E_b + \frac{N}{\eta_b} \cdot \tau_{\text{ок}}. \quad (15)$$

Термін окупності вітроустановки, електричного водонагрівника і ґрунтового теплового насосу:

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{\sum m_b \mathcal{E}_b - \sum m_a \mathcal{E}_a}{1/\eta_a - 1/\eta_b}, \quad (16)$$

де $m_a = \frac{M_a}{N}$, $m_b = \frac{M_b}{N}$ – питомі витрати ексергії в прототипі та новому варіантах відповідно; N – гарантована потужність, що віддається, однакова для обох порівнюваних варіантів, η_a , η_b – ексергетичний ККД порівнюваних варіантів по використанню первинної ексергії.

Якщо ВДЕ дає гарантовану потужність без додаткового підключення до традиційного джерела енергії, то поточних витрат первинної енергії немає і можна вважати $\eta_b = \infty$. Тоді строк окупності може бути визначений за формулою

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{\eta_a}{3600 \cdot h} (\sum m_b \mathcal{E}_b - \sum m_a \mathcal{E}_a), \quad (17)$$

де h – час роботи установки за рік, год/рік.

ККД нової установки:

$$\eta_b = \frac{h}{h_a} \eta_a, \quad (18)$$

де h_a – час, коли установка не працює, год/рік.

Розглянувши роботу прототипу (системи гарячого водопостачання і опалення котеджу) [14] енергетичної установки, нами були визначені недоліки в роботі та зроблені висновки. Схема роботи прототипу представлена на рис. 1.

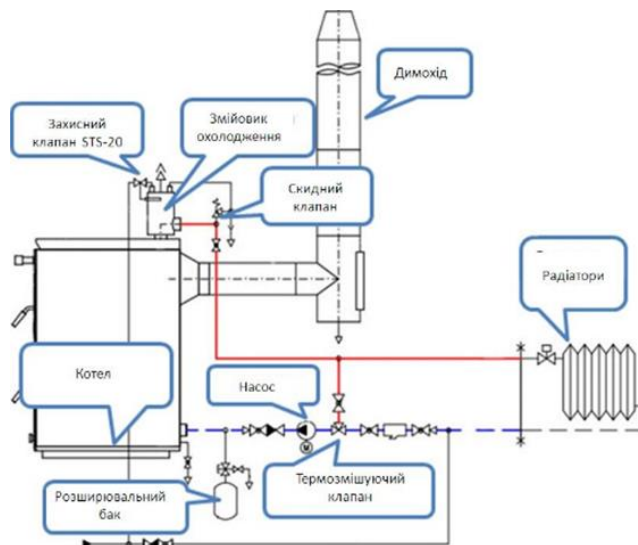


Рисунок 1 – Принципова схема системи гарячого водопостачання і опалення котеджу (прототипу)

Аналіз роботи системи гарячого водопостачання і опалення будинку (прототип) з використанням газового котла виявив наступні недоліки:

1. Складний пристрій закритого газового пальника для побутового котла має складну конструкцію, що ускладнює ремонтні роботи.
2. Чим більше деталей, тим частіше ламається обладнання.
3. «Турбований» агрегат коштує на 10–15 % дорожче порівняно з атмосферними аналогами.
4. Підвищений рівень шуму, який залежить від обраної модифікації. Вбудований в систему вентилятор сильно гуде.
5. У разі відключення електрики обладнання припиняє роботу. Вирішити цю проблему допоможе придбання джерела безперебійного живлення.
6. Найпростішим вважається спосіб розпалювання з гнотом – з палаючим запальником. При спрацюванні автоматики, газ підпалюється гнотом, після чого прилад починає гріти воду. Негативних моментів у цьому два – підвищена витрата палива та недостатній ступінь безпеки, оскільки запальник може згаснути. Первинний розпал виконується сірниками або із застосуванням п'єзoeлементa. Другим способом є електронний розпал газового приладу – його забезпечує високовольтний перетворювач, енергія для якого надходить за рахунок електрики або батарейок.
7. Живлення електроенергією здійснюється за допомогою магістральної електромережі, яка може відключатися.

Розглянувши всі недоліки вищезазначеної технологічної схеми ми прийняли таке рішення:

- 1) замінити котел з газовим пальником на систему, що забезпечує приватне домоволодіння гарячою водою за допомогою електричного водонагрівника, опалювання за допомогою геотермального ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода", батареї опалювання на водяну теплу підлогу, магістральну електромережу на вітроелектроенергетичну установку;
- 2) поліпшити конструкцію системи опалення, застосувавши нове обладнання;
- 3) підвищити ККД теплового насоса за рахунок застосування нових матеріалів, теплоносіїв та іншого допоміжного обладнання;
- 4) виконати оптимізацію, інтеграцію та автоматизацію основних вузлів теплового насосу;
- 5) удосконалити роботу теплоенергетичної установки за допомогою ЕОМ;
- 6) зменшити вартість установки за рахунок зниження матеріалоемності установки, застосування нових матеріалів і встановлення нового обладнання;
- 7) зробити теплотехнічні розрахунки теплового насосу;
- 8) зробити розрахунки вітроелектроенергетичної установки;
- 9) розробити нову технологічну схему.

Спроектовано, виготовлено та встановлено [11, 15, 16] нову енергетичну установку у приватному домоволодінні, принципова технологічна схема якої представлена на рис. 2.

Принцип роботи установки при роботі у теплу пору року.

Вода із свердловини 1 циркуляційним насосом 2 подається в апарат хімоводоочищення 3, де очищується від багатьох солей і надходить в бак-акумулятор 4. Далі циркуляційним насосом 5 вода подається в електричний водонагрівач 6, де нагрівається до температури 75 °С, і надходить в бак-акумулятор 7. З бака-акумулятора 7 циркуляційним насосом 9 вода подається у другий контур 10 охолоджувача і другий контур 12

конденсатора ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода" і поступає користувачу 17 на гаряче водопостачання і опалення. Зворотна вода від користувача 17 подається в установку хімоводоочищення 18, де очищається, і циркуляційним насосом 19 по трубопроводам 26 подається в бак-акумулятор 4. У разі аварійної ситуації є можливість випустити теплоносії у каналізацію 8 (злив води із системи). Якщо зовнішня температура підвищується до дискомфортного рівня, тепловий насос вмикає кондиціювання повітря. Циркуляційним насосом 23 вода з ґрунтового теплообмінного колектора 25 надходить до контуру теплої підлоги, охолоджує поверхню підлоги і повітря в кімнатах будинку до оптимальної комфортної температури.

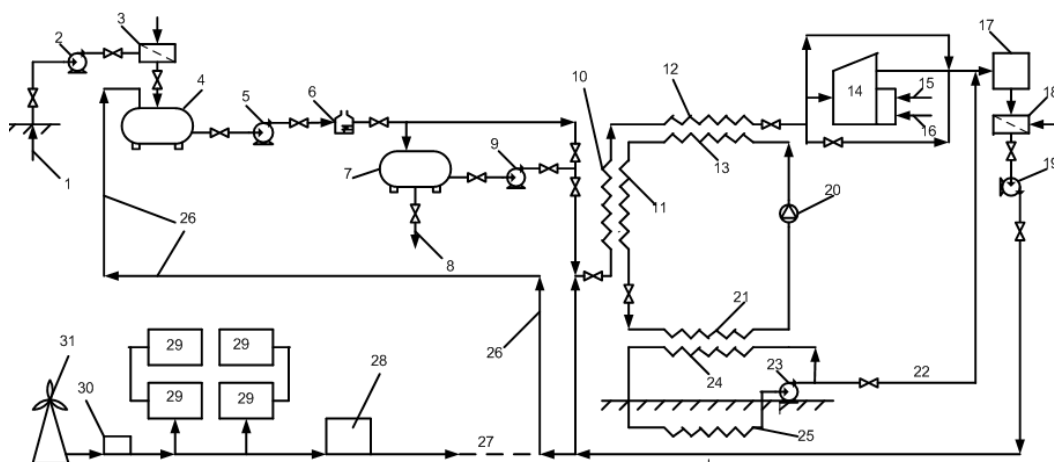


Рисунок 2 – Принципова технологічна схема нової енергетичної установки

- 1 – свердловина води; 2 – циркуляційний насос; 3, 18 – апарати хімоводоочищення;
- 4 – бак-акумулятор; 5 – циркуляційний насос; 6 – електричний водонагрівник;
- 7 – бак-акумулятор; 8 – злив теплоносія з установки; 9 – циркуляційний насос;
- 10 – другий контур підігрівача ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 11 – перший контур підігрівача ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 12 – другий контур конденсатора ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 13 – перший контур конденсатора ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 14 – тепловий дублер; 15 – газовий пальник; 16 – подача повітря в тепловий дублер;
- 17 – приватне домоволодіння; 19 – циркуляційний насос; 20 – компресор ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 21 – перший контур випарника ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 22 – трубопровід подачі холодного теплоносія (режим кондиціювання);
- 23 – циркуляційний насос; 24 – другий контур випарника ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 25 – тепловий контур ґрунтового теплового насоса;
- 26 – трубопровід оборотного теплоносія; 27 – електроз'єднання змінного струму 220 в;
- 28 – інвертор; 29 – акумулятори постійного струму 48 в; 30 – контролер; 31 – вітрогенератор

Механізм дії системи для функціонування цілорічної експлуатації.

Протягом теплої пори року принцип роботи наведено вище. У холодну пору року система працює наступним образом.

Вода з температурою $5 \div 7$ °С теплообмінного колектора 25 ґрунтового теплового насоса циркуляційним насосом 23 подається в другий контур 24 випарника теплового насоса, де нагріває холодоагент першого контуру 21, який перетворюється в пару. Пара холодоагенту надходить у компресор 20, де стискається до високої 160 °С температури та тиску. Далі пара надходить у перший контур 13 конденсатора теплового насоса, де

віддає своє тепло другому контуру 12 конденсатора [13], в який подається вода циркуляційним насосом 9 з бака-акумулятора 7, або циркуляційним насосом 19 від користувача 17. Таким чином, вода нагрівається спочатку в другому контурі 12 конденсатора, а потім у другому контурі 10 охолоджувача і надходить до користувача 17 з температурою 75 °С. Коли з ладу виходить тепловий насос і електричний водонагрівник 6, то в якості теплового дублера виступає котельна установка 14 з газовим пальником 15 і повітряним наддувом 16, яка підігріває воду до необхідної температури і подає її в систему гарячого водопостачання та опалення приватного домоволодіння. При виникненні аварії теплоносії зливається в каналізаційну систему 8. Паливний накопичувач складається з теплоізольованої ємності для накопичення енергії з теплоносієм (гарячою водою), пристрою для заповнення та зливу енергоносія, а також додаткового оснащення. Зберігання енергії являє собою фізичний або хімічний технологічний процес, при якому паливо зберігається в накопичувачі теплової енергії. Система зберігання характеризується методами, коли енергія, що надходить в акумулятор, отримується від джерела, перетворюється (при необхідності) в необхідну форму енергії і доставляється кінцевому споживачу.

Накопичення і директивне зберігання палива здійснюється в акумулюючому баку, який ми обрали тому, що середовище накопичення і теплообміну є єдиним середовищем і середовищем споживання [12]. Теплоносії може бути твердим, рідким, газоподібним або двофазним (рідина плюс газ). Для нашого випадку акумулюючим середовищем є рідина.

Розроблена та вибрана нами вітроустановка дозволяє забезпечувати приватне домоволодіння з господарством електроенергією та накопичувати її в акумуляторах постійного струму 29 потужністю 48 В. Контролер 30 та інвертор 28 дозволяє подавати необхідну електрику потужністю 220 В через електроз'єднання змінного струму 27 в приватне домоволодіння 17.

Витрати ексергії на проектування та виготовлення прототипу зазначені в таблиці

1. Витрати ексергії на проектування та виготовлення нового проекту зазначені в таблиці 2.

Таблиця 1 – Витрати ексергії на проектування та виготовлення прототипу

Матеріал	Маса M_a , кг	Питома енергоємність $\mathcal{E}_a$, МДж/кг	Повні витрати ексергії E , МДж	m_a	$m_a \cdot \mathcal{E}_a$
Котел з газовою горілкою	135	430	58050	0,0026	1,12
Ємність для повітря $V = 10 \text{ м}^3$	800	60	48000	0,0154	0,92
Металевий лист	40	60	2400	0,00077	0,046
Ізоляція, м^2	100	114	11400	0,0019	0,219
Вентилі	60	150	9000	0,00115	0,173
Розширювальний бак $V = 0,050 \text{ м}^3$	10	60	600	0,00019	0,0115

Продовження таблиці 1

Насоси, 2 шт	14	150	2100	0,00027	0,040
Трубопроводи метал.	100	60	6000	0,0019	0,1154
Трубопроводи ПВХ	120	50	6000	0,0023	0,115
Радіатори опалення 80 шт.х 8 кг	640	150	96000	0,012	1,85
Вода 0,8 м ³	800	30	24000	0,0154	0,46
Всього	—	—	263550	—	5,07
Всього з урахуван- ням витрат ексергії на обробку та збірку обладнання (коєфі- цієнт 1,2)	—	—	316260	—	—

Таблиця 2 – Витрати ексергії на проектування та виготовлення нової енергетич-
ної установки

Матеріал	Маса M_b , кг	Питома енер- гоємність $\mathcal{E}_b$, МДж/кг	Повні витрати ексергії E , МДж	m_b	$m_b \cdot \mathcal{E}_b$
1	2	3	4	5	6
Насоси, 5 шт	30	150	4500	0,00058	0,087
Ізоляція, м ²	1000	134	134000	0,019	2,58
Вентилі -20 шт.	60	150	4500	0,00115	0,173
Бак-акумулятор – 2 шт. $V = 6 \text{ м}^3$	600	60	36000	0,0115	0,69
Установка хімводоо- чищення 2 шт.	400	150	60000	0,0077	1,154
Тепловой насос – 1шт.	200	430	86000	0,0039	1,65
Вода 2,0 м ³	2000	30	60000	0,039	1,154
Трубопроводи метал.	100	60	6000	0,0019	0,115
Трубопроводи ПВХ	100	50	5000	0,0019	0,095
Акумулятори постій- ного струму – 4 шт.	400	1,146	459	0,0077	0,0088
Інвертор – 1 шт.	100	300	30000	0,0019	0, 57
Вітроустановка – 1 шт.	500	1,18	589	0,0096	0,0114
Контролер – 1 шт.	50	140	7000	0,00096	0,135
Електрокабелі	100	160	16000	0,0019	0,304
Свердловина води	120	7,1	852	0,0023	0,016
Сталь	200	7,1	1420	0,0039	0,027
Всього	—	—	452320	—	8,77
Всього з урахуванням витрат ексергії на об- робку та збірку облад- нання (коєфіцієнт 1,2)	—	—	542784,00	—	—

Результати розрахунків за формулами (16)–(18) наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунків

η_a	η_b	τ_{ok} , рік
0,4	0,802	2,1

Висновки. Представлені результати розрахунків вимірювання та надійності виробництва ексергії – нетто на прикладі енергетичної установки, яка забезпечує приватне домоволодіння електроенергією, гарячим водопостачанням, опаленням та гарячим повітрям у необхідному діапазоні температур для комфортного проживання. Був обраний прототип установки і вивчена його робота. Визначені недоліки як у роботі, так і в конструкції окремих вузлів. За результатами аналізу літературних джерел було підібрано нове за ефективністю устаткування. Розрахунок ефективності заміни старого устаткування на нове проводився відповідно до методики оптимізації за сумою питомих витрат ексергії – нетто. Була розроблена нова принципова технологічна схема енергетичної установки. Спільно з вітроелектрогенератором, електричним водонагрівачем використовується тепловий насос "грунт-вода", акумулятори електроенергії та теплоти, що дозволяє: зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання, економити органічне паливо; виробляти електроенергію та надлишок її віддавати в державну електромережу; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища. Система автоматизації дозволяє управляти комбінованою установкою за допомогою автоматизованого робочого місця без втручання людини цілий рік.

Література

1. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетичный метод и его применение. Москва : Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
2. Бродянский В. М. Эксергетичні розрахунки технічних систем : довід. посіб. / за ред. А. А. Долинського, В. М. Бродянского ; АН УРСР, Ін-т техн. теплофізики. Київ : Наукова думка, 1991. 360 с.
3. Бродянский В. М. Эксергетичний метод і перспективи його розвитку. *Теплоэнергетика*. 1988. № 2. С. 14–17.
4. Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Стасов В. А. Інтеграція роботи поновлюваних джерел енергії для гарячого водопостачання та опалення будівель. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2021. № 4. С. 3–12.
5. Ясников Г. П., Белоусов В. С. Эксергетическое представление в термодинамике необратимых процессов. *Инженерно-физический журнал*. 1977. Т. 32, № 9. С. 336–341.
6. Веретельник Т. І. Эксергетичний аналіз хіміко-технологічних систем. *Вісник ЧДТУ*. 2008. № 1. С. 192–195.
7. Степанова Т. Б. Методика комплексного энергетического анализа технических систем. *Известия вузов. Проблемы энергетики*. Казань : Казан. гос. энергет. ун-т, 2000. № 9–10. С. 50–61.
8. Сорин М. В., Бродянский В. М. Расчет химической эксергии на основе модели локальной окружающей среды. *Теоретические основы химической технологии*. 1985. Т. 19, № 1. С. 91–99.

9. Шевинский Я. С., Кисленко Н. А., Бобров Д. А. Разработка автоматизированной системы эксергетического анализа сложных химико-технологических систем. *Программные продукты и системы*. 1998. № 1. С. 11–15.
10. Теплоэнергетика и теплотехника : справочник. Кн. 2 : Теоретические основы теплотехники. Теплофизический эксперимент. Москва : МЭИ, 2001. 564 с.
11. Селіхов Ю. А., Коцаренко В. О., Горбунов К. О., Рябова І. Б. Інтеграція та оптимізація роботи системи опалення котеджу. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2017. № 3. С. 15–20.
12. Бекман У., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии. Москва : Мир, 1987. 224 с.
13. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы. пер. с англ. Москва : Энергоиздат, 1982. 224 с.
14. Особливості сучасних систем водяного опалення. Київ : ПДП «Такі справи», 2003. 176 с. : іл.
15. Даффи Дж., Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. Москва : Мир, 1977. 420 с.
16. Ляшков В. И., Кузьмин С. М. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : уч. пособ. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 96 с.

Bibliography (transliterated)

1. Brodianskyi V. M., Fratsher V., Mikhalek K. Ekserhetycheskiy metod i ego ispolzovanie. Moskva : Enerhoatomizdat, 1988. 288 p.
2. Brodianskyi V. M. Ekserhetychni rozrakhunky tekhnichnykh system : dovid. posib. / za red. A. A. Dolynskoho, V. M. Brodianskoho; AN URSS, In-t tekhn. teplofizyky. Kyiv : Naukova dumka, 1991. 360 p.
3. Brodianskyi V. M. Ekserhetychnyi metod i perspektyvy yoho rozvytku. *Teploenerhetyka*. 1988. № 2. P. 14–17.
4. Selikhov Yu. A., Gorbunov K. O., Stasov V. A. Intehratsiia roboty ponovliuvanykh dzherel enerhii dlia hariachoho vodopostachannia ta opalennia budivel. *Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia*. 2021. № 4. P. 3–12.
5. Yasnukov H. P., Belousov V. S. Ekserhetycheskoe predstavleniia v termodinamike neobratymikh protsessov. *Inzhenerno-fizycheskiy zhurnal*. 1977. T. 32, № 9. P. 336–341.
6. Veretelnik T. I. Ekserhetychnyi analiz khimiko-tekhnologichnykh system. *Visnyk ChDTU*. 2008. № 1. P. 192–195.
7. Stepanova T. B. Metodyka kompleksnogo enerhetycheskogo analiza tekhnicheskikh system. *Yzvestiya vuzov. Problemy enerhetyky*. Kazan : Kazan. gos. enerhet. un-t, 2000. № 9–10. P. 50–61.
8. Sorin M. V., Brodianskyi V. M. Raschet khimicheskoy ekserhii na osnove modeli lokalnoy okruzhayushhey sredi. *Teoreticheskiye osnovy khymicheskoi tekhnologii*. 1985. T. 19, № 1. P. 91–99.
9. Shevynskiy Ya. S., Kyslenko N. A., Bobrov D. A. Razrabotka avtomatyzirovannoy systemy ekserhetychnogo analiza slozhnykh khimiko-tekhnologicheskikh system. *Prohrammnye produkty y systemy*. 1998. № 1. P. 11–15.
10. Teploenerhetyka i teplotekhnika : spravochnik. Kn. 2 : Teoreticheskiye osnovy teploekhniki. Teplofizycheskiy eksperiment. Moskva : MEI, 2001. 564 p.
11. Selikhov Yu. A., Kotsarenko V. O., Gorbunov K. O., Riabova I. B. Intehratsiia ta optymizatsiia roboty systemy opalennia kotedzhu. *Intehrovani tekhnologii ta enerhozbere-*

zhennia. Kharkiv : ITE, 2017. № 3. P. 15–20.

12. Bekman U., Hilli P. Teplovoe akumulirovanie enerhii. Moskva : Myr, 1987. 224 p.

13. Rei D., Makmaikl D. Teplovye nasosy. per. z anhl. Moskva : Enerhoizdat, 1982. 224 p.

14. Osoblyvosti suchasnykh system vodianoho opalennia. Kyiv : PDP «Taki spravy», 2003. 176 p. : il.

15. Daffi Dzh., Bekman U. A. Teplovie protsessy s ispolzovaniem solnechnoy enerhii. Moskva : Myr, 1977. 420 p.

16. Liashkov V. I., Kuzmin S. M. Netradycionnye i vozobnovlyaemie istochniki enerhii : uch. posob. Tambov : Izd-vo Tamb. ujc. tekhn. un-ta, 2003. 96 p.

УДК 662.997

Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор, К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор,

І. Б. Рябова канд. техн. наук, професор, Е. Р. Нагорний, аспірант,

І. В. Пільник, аспірант, В. Г. Рись, аспірант

ВИМІРЮВАННЯ ТА НАДІЙНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА ЕКСЕРГІЇ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ

Проблеми енергозбереження нині мають значення у зв'язку з обмеженістю природних ресурсів, нерівномірним їх розподілом, і навіть у зв'язку з зростаючим техногенним забрудненням довкілля, до яких відносяться продукти згоряння традиційних джерел енергії – органічного палива, використовуваного виробництва теплової енергії в котельних установках. Зменшення шкідливого впливу на довкілля досягається використанням нетрадиційних джерел енергії. Був обраний прототип установки і вивчена його робота. Розглянувши роботу прототипу (системи гарячого водопостачання і опалення ко-теджу) енергетичної установки, нами були визначені недоліки в роботі та зроблені висновки. У прототипі енергетичній установці застосовується газовий котел. А в новій енергетичній установці використовується: електричний водонагрівач, геотермальний ґрунтовий тепловий насос "ґрунт-вода" і вітроелектрогенератор.

Представлені результати розрахунків вимірювання та надійності виробництва ексергії – нетто на прикладі енергетичної установки, яка забезпечує приватне домо-водіння електроенергією, гарячим водопостачанням, опаленням та гарячим повітрям у необхідному діапазоні температур для комфортного проживання. За результатами аналізу літературних джерел було підбрано нове за ефективністю устаткування. Розрахунок ефективності заміни старого устаткування на нове проводився відповідно до методики оптимізації за сумою питомих витрат ексергії - нетто. Була розроблена нова принципова технологічна схема енергетичної установки. Спільно з вітроелектрогенератором, електричним водонагрівачем використовується тепловий насос "ґрунт-вода", акумулятори електроенергії та теплоти, що дозволяє: зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання, економити органічне паливо; виробляти електроенергію та надлишок її віддавати в державну електромережу; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища. Система автоматизації дозволяє керувати комбінованою установкою за допомогою автоматизованого робочого місця без втручання людини цілий рік.

Були розраховані ККД прототипу та нової комбінованої енергетичної установки

та термін окупності нової енергетичної установки.

Ключові слова: вимірювання, надійність, виробництво ексергії, довкілля, оточення системи, різниця потенціалів, інженерна позиція, потоки енергії, потоки речовин, енергетичні баланси, ексергетичний баланс, оцінка придатності, температурний потенціал енергії, газові котли, електричні водонагрівачі, геотермальні, ґрунтові теплові насоси, вітроелектрогенератори, джерела ресурсів, мінеральна сировина, паливо, геотермальні води, сонячне випромінювання, джерела енергії, ексергетичний метод розрахунку, термодинамічні методи розрахунку, акумулювання, акумулятори постійного струму.

Yu. A. Selikhov, K. O. Gorbunov, I. B. Riabova, E. R. Nagorniy, I. V. Pilnyk, V. G. Ris

MEASUREMENT AND RELIABILITY OF ENERGY PRODUCTION IN A POWER PLANT

Energy conservation issues are currently important due to the limited availability of natural resources, their uneven distribution, and also due to the growing man-made pollution of the environment, which includes combustion products of traditional energy sources – organic fuels used to produce thermal energy in boiler plants. Reducing the harmful impact on the environment is achieved by using non-traditional energy sources. A prototype of the installation was selected and its operation was studied. Having studied the operation of the prototype (hot water supply and heating system of the cottage) of the power installation, we identified shortcomings in the operation and made conclusions. The prototype power plant uses a gas boiler. The new power plant uses an electric water heater, a geothermal ground source heat pump and a wind generator. The results of calculations of measurement and reliability of net exergy production are presented using the example of a power plant providing a private home with electricity, hot water, heating and hot air in the required temperature range for comfortable living. Based on the results of the analysis of literary sources, new equipment was selected in terms of efficiency. The calculation of the efficiency of replacing old equipment with new was carried out in accordance with the optimization method based on the sum of specific exergy costs - net. A new basic technological scheme of the power plant was developed. Together with a wind generator and an electric water heater, a ground-to-water heat pump, electric power and heat accumulators are used, which allows: to reduce the cost of thermal energy by reducing material consumption and equipment costs, to save organic fuel; to produce electricity and give its surplus to the state power grid; to reduce the heat load and environmental pollution. The automation system allows the combined plant to be controlled by an automated workstation without human intervention all year round. The efficiency of the prototype and the new combined power plant and the payback period of the new power plant were calculated.

Keywords: measurement, reliability, exergy production, environment, system surroundings, potential difference, engineering position, energy flows, material flows, energy balances, exergetic balance, fitness assessment, energy temperature potential, gas boilers, electric water heaters, geothermal, ground heat pumps, wind power generators, resource sources, mineral raw materials, fuel, geothermal waters, solar radiation, energy sources, exergetic calculation method, thermodynamic calculation methods, storage, direct current batteries.

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, професор,
А. М. МИРОНОВ, канд. техн. наук, доцент, М. В. ІЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент,
М. М. КОЗУЛЯ, канд. техн. наук, доцент, В. К. ГОРБУНОВ, студент

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ЯК ІНСТРУМЕНТ ХІМІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ: АНАЛІЗ, МОДЕЛЮВАННЯ, ЧИСЛОВІ МЕТОДИ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ІНТЕГРАЦІЯ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: штучний інтелект, хімічна інженерія, інформаційні технології, ІІІ, математичне моделювання, імітаційні моделі, інтеграція, оптимізація, симуляція.

Вступ. Сучасна хімічна інженерія стрімко змінюється під впливом розвитку тих цифрових технологій та новітніх підходів до обробки великих обсягів даних, які здатні забезпечити найбільш експертні, швидкі, гнучкі та добре керовані рішення. Однією з ключових рушійних сил цих змін на початку 2020-х років став штучний інтелект (ІІІ), який відкриває принципово нові можливості для аналізу, оптимізації та моделювання складних хімічних процесів [1]. На відміну від усіх традиційних методів розрахунків та емпіричних підходів, інтелектуальні системи здатні швидко аналізувати багатофакторні залежності, передбачати поведінку хімічних систем й подекуди за потреби підбирати оптимальні режими роботи установок у режимі реального часу [2].

Актуальність використання ІІІ у хімічній інженерії зумовлюється необхідністю підвищення енергоефективності виробництв, мінімізації шкідливих викидів та зменшення витрат усіх видів сировини та ресурсів. Крім того, на тлі посилення вимог до екологічної безпеки та просування на міжнародному рівні концепції сталого розвитку промисловості, використання дійсно просунутих інтелектуальних алгоритмів дозволяє проектувати більш екологічні й економічно вигідні технологічні процеси [3]. Сьогодні ІІІ знаходить застосування у різних сферах хімічної інженерії: від вирішення складних обернених задач та оптимізації показників реакцій до розв'язання багатопараметричних оптимізаційних задач та прогнозування властивостей матеріалів. Числові методи, що традиційно використовуються для математичного та імітаційного моделювання, підсилюються за рахунок алгоритмів машинного навчання та глибинних нейронних мереж, що підвищує точність і швидкість розрахунків. Водночас сучасні мови програмування та платформи з відкритим кодом сприяють активному впровадженню ІІІ у прикладні інженерно-дослідницькі задачі [4].

Попри значний прогрес, чимало питань інтеграції ІІІ у галузь хімічної інженерії для дослідницьких та виробничих цілей і досі залишаються відкритими: ефективність поєднання ІІІ з традиційними числовими методами, обґрунтування вибору алгоритмів для різних класів задач, нездатність систем «розуміти контекст» реальної ситуації цеху або технологічної лінії, а також проблеми масштабування та адаптації моделей задля конкретних застосунків – доволі типових промислових об'єктів, які застосовуються у формально вкрай схожих, але ситуативно дуже різних операцій.

Метою даної статті є аналіз сучасних методів та прийомів використання ІІІ у хімічній інженерії, дослідження його обмежень, прикладів ефективного застосування для розв'язання інженерних задач та визначення перспектив розвитку цієї технології у контексті моделювання, оптимізації процесів та управління хімічними виробництвами.

Аналіз літератури. Розвиток методів штучного інтелекту у хімічній інженерії детально описується у численних дослідженнях трьох останніх років, що свідчить про швидке зростання цього наукового напрямку та інтересу до нього не тільки у рамках ІТ-

сфери та дотичних до неї прикладних галузей. Більшість досліджень підтверджують зростання зацікавленості науковців у поєднанні класичних числових методів з якомога більш сучасними підходами – від машинного навчання, зокрема глибинних нейронних мереж, до блокчейну та еволюційних алгоритмів.

Загалом, зацікавленість подібною тематикою є прямим продовженням достатньо традиційного для хімічної інженерії інструменту – математичного моделювання. Так, у роботі [5] 2021 року, вже систематизовано способи математичного моделювання хімічних процесів та окреслено проблеми, які постають при використанні класичних числових методів. Автори підкреслюють, що традиційні підходи не завжди ефективні у випадках багатокомпонентних реакцій або за відсутності достатньої експериментальної бази. У таких випадках методи штучного інтелекту демонструють набагато кращі прогностичні властивості, навіть не будучи здатні усвідомити фізико-хімічну основу процесу. Так, у [6] представлено огляд сучасних алгоритмів машинного навчання для моделювання та оптимізації процесів. Автори звертають увагу на те, що машинне навчання вже активно використовується для створення моделей, які дозволяють легко та коректно обходити складні аналітичні залежності. Особливо корисними ці підходи є для оптимізації процесів теплообміну, масопереносу та кінетики реакцій.

Інтерес викликає також дослідження [7], у якому детально проаналізовано, як методи штучного інтелекту інтегруються у системи управління хімічними установками. Автори відзначають ефективність предиктивного управління, яке здатне поєднувати відомі моделі машинного навчання із класичними PID-регуляторами задля підвищення стабільності виробничих процесів. Згідно з оглядом [8], значну роль відіграє поєднання штучного інтелекту з технологіями Big Data (великі дані) та керуванням потоками. Такі інтегровані підходи дозволяють відслідковувати стан обладнання у режимі реального часу та здійснювати ранню діагностику несправностей. Дослідження [9] демонструє застосування машинного навчання для моделювання поведінки гетерогенних термічних каталізаторів. Результати свідчать про можливість передбачення змін активності таких каталізаторів на основі історичних даних та експериментальних дослідів, що відкриває нові підходи до планування їх технічного обслуговування. У роботі [10] розглядаються методи використання ШІ для оптимізації складу сировини та параметрів реакцій у хімічній технології полімерів. Автори доводять ефективність різноманітних алгоритмів та глибинного навчання для багатопараметричної оптимізації, яка традиційно потребує значних часових витрат. Більшість авторів погоджуються, що повністю автоматизоване управління складними хімічними процесами наразі є частково досяжним, але водночас перспективи розвитку цього напрямку є вкрай високою.

Окрім того, виникають нові напрями досліджень – наприклад, поєднання ШІ з цифровими «двійниками» хімічних установок [11] або розробка систем підтримки прийняття інженерних рішень на основі обробки великих потоків даних у реальному часі [12]. Чимало дослідників розглядають перспективи гібридного моделювання низки хімічних процесів, поєднуючи наукові знання та аналітику даних. Зокрема, ШІ активно залучають у якості інструменту машинного навчання (МН), коли МН доповнює науку, а наука доповнює МН. У роботі [13] розглянуто застосування МН задля покращення науково обґрунтованих моделей при прямому послідовному і паралельному гібридному моделюванні та їхніх комбінаціях, зворотному моделюванні, а також кількісній оцінці невизначеності у технологічному процесі і виявленні керівних рівнянь моделі процесу.

Доцільно окремо розглянути, як ШІ наразі використовується задля оптимізації енергоспоживання у хімічних технологіях. Зокрема алгоритми глибинного навчання вже активно використовують для побудови моделей споживання енергії та виявлення неефективних ділянок у процесах дистиляції та ректифікації. Це дозволяє дуже суттєво знижувати витрату греючої пари та електроенергії на виробництвах типової топології технологічних зв'язків. Більш детальне дослідження [14] демонструє, яким чином МН

впроваджується для оптимізації процесів виробництва біопалива. Автори показують, що інтелектуальні моделі дозволяють підбирати оптимальні умови переробки біомаси, знижуючи витрати каталізаторів та покращуючи вихід цільових продуктів. У статті [15] докладно описані системи підтримки прийняття рішень у хімічній інженерії на основі ШІ. Дослідники розглядають розробку гібридних експертних систем, які поєднують класичні бази знань з адаптивними алгоритмами машинного навчання. Такий підхід спрощує роботу операторів складних виробництв і мінімізує ймовірність помилок.

Ще один важливий напрямок – використання ШІ задля прогнозування корозії обладнання. У роботі [16] подано результати використання моделі на основі ШІ, яка аналізує експлуатаційні параметри трубопроводів та реакторів і визначає ймовірність пошкоджень. На практиці це дозволяє ефективно планувати профілактичні ремонти та легко уникати аварій. У дослідженні [17] показано, як інтелектуальні алгоритми вже сьогодні застосовуються для аналізу параметрів мембранних процесів очистки стічних вод. Автори показують, як ШІ здатен адаптовувати роботу мембранних установок до змін у складі забруднювачів, що є особливо актуальним для низки хімічних виробництв із нерівномірним навантаженням.

Не менш цікаві результати наведено у роботі [18], де автори використовують штучний інтелект для виявлення відхилень у хімічних процесах на ранніх стадіях. Це дослідження демонструє ефективність нейронних мереж для задач із прогнозування аварійних ситуацій, що підвищує безпеку виробництв. Сучасна література підкреслює важливість застосування інтелектуальних алгоритмів для проектування нових хімічних сполук та матеріалів. У статті [19] розглядаються приклади використання глибинного навчання для передбачення властивостей пористих матеріалів і каталізаторів, що може суттєво прискорити розробку більш просунутих технологій їх синтезу. Особливої уваги заслуговує комплексне дослідження [20], у якому описується спосіб поєднання методів машинного навчання із роботизованими лабораторіями. Такий підхід забезпечує майже повністю автономне проведення хімічних дослідів, швидкий аналіз отримуваних даних та самокорекцію експериментальних умов. У майбутньому це відкриває горизонти для проведення складних, небезпечних та навіть просто тривалих експериментів без участі людини, й демонструє перспективу повної автоматизації досліджень у галузі хімічної інженерії та проектування процесів і апаратів хімічної технології.

Підсумовуючи усе вищенаведене, слід зазначити, що домінуюча частка сучасної наукової літератури у різних країнах світу здебільшого акцентує на важливості синергії між класичними методами та новими інтелектуальними алгоритмами. Очевидно, що різні способи впровадження штучного інтелекту у якості повноцінного інструмента для задач хімічної інженерії сприятимуть розв'язанню цілої низки традиційних проблем, пов'язаних з моделювання, оптимізації та управління технологічними процесами. Це формує наукове підґрунтя для подальших експериментів та прикладних досліджень та розробки нових програмних і апаратних рішень. Варто відзначити ключову особливість взаємодії – спрощення відбувається на кожному етапі: постановка задачі, відтворення, імітація або проведення експерименту, оптимізація цілей та засобів дослідження, аналіз отриманих результатів, формування висновків та визначення перспектив дослідження.

Застосування ШІ у хімічній інженерії. З огляду на наведену теоретичну базу, розглянемо конкретні приклади використання методів штучного інтелекту у хімічній інженерії. Сфери застосування охоплюють математичне моделювання, оптимізацію процесів, автоматизоване управління, прогнозування властивостей матеріалів/речовин, підтримку прийняття рішень та інші прикладні задачі, критично важливі для сучасного інженерно-технологічного середовища. Здійснимо класифікацію способів застосування ШІ як наукового інструменту, придатного до обробки значних масивів інформації.

1. Застосування ШІ у математичному та імітаційному моделюванні.

Традиційні підходи до математичного моделювання у хімічній інженерії зазвичай вимагають точного опису фізико-хімічних закономірностей, а також спрощення складних багатофакторних систем. ШІ дозволяє побудувати так звані моделі «чорної скриньки», які не потребують явного опису усіх залежностей, а натомість навчаються на основі експериментальних або історичних даних.

Наприклад, у дослідженні [21] було реалізовано модель на основі штучних нейронних мереж для моделювання тепломасообміну у реакторі з псевдозрідженим шаром. Порівняно з традиційними методами, модель ШІ демонструє вищу точність при зміні вхідних параметрів та скорочення часу моделювання у 3–5 разів, що є безсумнівним показником значного покращення продуктивності роботи проектувальника. Ще одним доволі цікавим прикладом є використання гібридних моделей, які поєднують фізико-хімічні рівняння з навчанням на масивах даних. У роботі [22] описується застосування таких моделей для прогнозування поведінки ферментативних біореакторів. На практиці це дозволить отримувати точні прогнози навіть при нестандартних режимах роботи цих реакторів та за умов відсутності повної інформації про кінетику.

2. Оптимізація технологічних процесів.

ШІ є особливо ефективним для багатопараметричної оптимізації, де усі класичні методи потребують численних ітерацій. Наприклад, при виробництві аміаку ключовим завданням є одночасна оптимізація температури, тиску, співвідношення реагентів та швидкості потоку. Водночас, ШІ не відчуває суттєвих обмежень при зведенні подібних математичних систем, й успішно демонструє збіжність розв'язків навіть для складних багатокомпонентних сумішей та азеотропних систем.

У дослідженні [23] використано генетичні алгоритми у поєднанні з нейронними мережами для пошуку оптимальних умов реакції Габера-Боша. В результаті досягнуто збільшення виходу аміаку на 7,5 % при зменшенні енерговитрат на 4 %. Такий підхід був би неможливим у межах лише класичного термодинамічного аналізу (або на це б знадобилися роки напруженої роботи цілої групи фахівців). Ще один доволі виразний приклад – оптимізація процесів полімеризації. У роботі [24] показано, як алгоритми глибокого навчання дозволяють передбачити ключові властивості полімеру (в'язкість і молекулярна маса) на основі варіацій у складі суміші та температурному режимі. Це дозволяє розробити нові рецептури без тривалих серій лабораторних експериментів.

3. Прогнозування технічного стану обладнання.

Однією з критичних проблем хімічної промисловості є адекватне передбачення відмов технічного обладнання – від доволі недорогих насосів і компресорів до більш коштовних реакторів та теплообмінників. ШІ тут може застосовуватися для всебічного аналізу вібраційних, температурних, акустичних та інших типів впливів.

У роботі [25] запропоновано застосування рекурентних нейронних мереж для прогнозування відмов пластинчастих теплообмінників. Модель дозволяє з надвисокою точністю визначити ймовірність несправності обладнання вже за декілька діб до його фактичного виходу з ладу. Це не просто надало змогу скоротити кількість аварійних зупинок підприємства, але й дало можливість оцінювати стан теплообмінників у будь-які моменти часу при їх роботі. Інший цікавий приклад – використання спеціальних класифікаційних моделей для виявлення відхилень у режимах компресорних станцій [26]. Автори дослідження відзначають, що навчання моделей відбувається без потреби у реалізації детальної фізичної моделі об'єкта, лише на основі потоків процесних даних.

4. Автоматизоване управління процесами.

III також відіграє ключову роль у побудові інтелектуальних систем управління. Традиційні підходи, що базуються на ПІД-регуляторах, мають обмежену гнучкість й не враховують складні взаємозв'язки між змінними. Алгоритми машинного навчання – зокрема Q-learning та глибоке навчання з підкріпленням (Deep RL), відкривають нові підходи до адаптивного управління.

У роботі [27] продемонстровано впровадження системи управління для реактора полімеризації, що ґрунтується на Deep RL. Система самостійно навчалася досягати усіх заданих властивостей продукту, коригуючи параметри у відповідь на низку зовнішніх збурень. Такий підхід забезпечив вищу стабільність процесу та точніше дотримання характеристик якості продукції. У свою чергу, у парових установках, як показує [28], використання адаптивних нейромережевих регуляторів дозволяє стабілізувати низку параметрів середовища при мінливому складі сировини. Порівняно з усіма класичними схемами, похибка регулювання зменшилась на 25 %, що є критичним для забезпечення безпеки та енергоефективності.

5. Розробка нових матеріалів та сполук.

Окрему категорію становлять задачі хемоінформатики, зокрема проєктування нових молекул, прогнозування їх властивостей, синтетичних шляхів і стабільності. Тут III використовується у поєднанні з квантовою хімією та вже відомими бібліотеками структурних даних.

У роботі [29] описано застосування глибинних генеративних моделей для пошуку нових антибактеріальних сполук. Хоча дослідження виконано для фармацевтики, алгоритми аналогічного класу активно застосовуються й у проєктуванні каталітичних матеріалів, поверхнево-активних речовин та нових полімерів у хімічній інженерії. Крім того, заслуговує уваги проєкт Materials Genome Initiative, у межах якого III активно й цілеспрямовано використовується для передбачення властивостей матеріалів на основі їхньої молекулярної структури та фізико-хімічних характеристик [30]. Застосування таких підходів скорочує шлях від ідеї до готового матеріалу з кількох років до кількох місяців, фактично повторює, на сучасний лад, винаходячи науковий підхід.

6. Поєднання III та числових методів у хімічній інженерії.

Числові методи залишаються основою аналітичної частини хімічної інженерії – вони широко застосовуються для розв'язання диференціальних рівнянь, моделювання теплопереносу, масопереносу, хімічної кінетики. Проте багато типових задач, особливо обернені або мультифакторні, мають високу обчислювальну складність та вимагають значних ресурсів. У таких випадках III не замінює числові методи, а просто ефективно їх доповнює.

У роботі [31] продемонстровано, як нейронні мережі використовуються задля прискорення розрахунків при розв'язанні задач теплопереносу добре відомим методом скінченних різниць. Після навчання на масиві числових розв'язків, модель III змогла обчислювати розподіл температури у хімічному реакторі з точністю до 98% порівняно з класичним методом, але вдесятеро швидше.

Інший підхід – використання III для оцінки параметрів моделей, які не можна виміряти безпосередньо. Наприклад, в задачах масопереносу у пористих середовищах, як описано у дослідженні [32], машинне навчання дозволяє апроксимувати коефіцієнти дифузії за непрямыми експериментальними спостереженнями, що значно спрощує як ідентифікацію моделей без необхідності складних експериментів, так і повторюваність таких експериментів.

Цікавою є й робота [33], у якій з нейромережею поєднано метод Монте-Карло, спрямований на розв'язання задач хімічної кінетики. Замість багаторазових запусків

обчислень, модель навчається на обмеженій вибірці й забезпечує прогноз із тією самою точністю, що й повний стохастичний розрахунок. Це відкриває шлях до аналізу різних динамічних систем у реальному часі. Крім того, алгоритми ШІ застосовують як заміну або доповнення до класичних оптимізаційних чисельних методів (градієнтних, квазі-ньютонівських, симплексних). Так, у дослідженні [34] показано, що поєднання низки генетичних алгоритмів з чисельним розв'язанням рівнянь реакційного процесу може дозволити знайти глобальний оптимум там, де традиційні методи завжди «застрягають» у локальних мінімумах.

7. Інтеграція хіміко-технологічних систем із використанням ШІ.

Сучасні хімічні виробництва – це складні багаторівневі системи, що включають технологічне, енергетичне, логістичне та інформаційне середовища. Завдання інтеграції таких систем передбачає координацію численних підсистем у режимі реального часу. ШІ є ключовим інструментом у цій інтеграції. Дедалі більше дослідників зводять усе до концепції «розумного заводу», де усі компоненти – від датчиків до способу планування виробничого графіку – пов'язані через єдину платформу з використанням ШІ. Ті самі алгоритми оптимізують завантаження обладнання, черговість технологічних операцій та розподіл енергетичних потоків.

ШІ та симуляційне програмне забезпечення широко застосовується у інтеграції процесів промислових виробництв: починаючи від простої процесної оптимізації без встановлення цільової функції, і завершуючи повноцінними схемами реконструкції на базі прийомів пінч-проекування. Наприклад, автором дослідження [35] пропонується новий інструмент моделювання для пінч-інтеграції теплообмінників і теплових насосів для різних прикладних задач промисловості. Він має весь типовий набір функцій інших програмних застосунків для обрахунку пінч-інтеграції, але здатен швидше генерувати якісні альтернативні схеми.

Крім того, гарним прикладом є застосування мультиагентних систем (MAS), які моделюють взаємодію незалежних підсистем (реакторів, теплообмінників, транспорту) в умовах загальних обмежень. У роботі [36] описано, як такі системи з використанням машинного навчання координують роботу підприємства в умовах динамічних змін у попиті, вартості енергоносіїв та під час логістичних збоїв. Також вкрай перспективним є поєднання цифрових двійників з інтелектуальними системами управління. У статтях закордонних авторів дедалі частіше зустрічаються дослідження цифрових двійників технологічних комплексів, які здатні у режимі реального часу аналізувати процеси й моделювати сценарії, передбачаючи можливі критичні ситуації.

Нарешті, інтеграція можлива і на рівні управління персоналом та різних щаблях технічного обслуговування. У дослідженні [37] демонструється, що сучасні системи планування ремонтів, які враховують прогнози відмов обладнання, здатні знизити час простою установок на 35 %. ШІ тут виконує роль зв'язуючої ланки між інженерними, логістичними та адміністративними блоками підприємства.

Отже, ШІ є не просто інструментом розв'язання окремих задач, а ядром нової архітектури управління хіміко-технологічними системами, що забезпечує адаптивність, прозорість та масштабованість на всіх рівнях.

Обговорення результатів. Проведений огляд та аналіз конкретних прикладів застосування штучного інтелекту у хімічній інженерії та промисловому виробництві засвідчують глибоку трансформацію галузі під впливом усіх сучасних інформаційних технологій. Результати аналізу дозволяють сформулювати декілька ключових тез щодо переваг, обмежень та напрямів подальшого розвитку інтеграції ШІ у виробництво та хімічно-технологічні системи.

1. Штучний інтелект як засіб подолання обмежень традиційного інженерного аналізу. Класичні числові методи в хімічній інженерії й досі залишаються потужним інструментом розв'язання диференціальних рівнянь, оптимізаційних задач та побудови математичних моделей, однак їх застосування часто ускладнене високою складністю процесів, нестачею точних фізичних даних або необхідністю обробки великих масивів змінних параметрів. У таких випадках інтелектуальні алгоритми машинного навчання демонструють здатність виявляти закономірності, які важко виразити аналітично, та ефективно апроксимувати їх у вигляді складних функцій, придатних для сприйняття. Використання ШІ для прогнозування поведінки систем (наприклад, з процесами теплопереносу або масообміну) не лише пришвидшує процеси моделювання, але й робить їх доступними для систем управління у реальному часі. Це підтверджують приклади із застосуванням нейромережових моделей у симуляціях псевдозріджених шарів, реакторів, мембранних установок тощо.

2. Ефективність гібридних рішень: інтеграція фізичних моделей і ШІ. Практичні кейси демонструють, що найефективнішими є гібридні системи, які вдало поєднують переваги обох підходів – традиційного математичного апарату та адаптивності машинного навчання. Такі системи не лише вчаться на емпіричних даних, але й зберігають фундаментальну фізичну інтерпретацію процесів. Тож забезпечується як точність, так і стабільність моделей, що критично важливо для впровадження у технологічний цикл. Цей підхід дозволяє масштабувати рішення на нові об'єкти з мінімальними витратами на повторне моделювання та адаптацію алгоритмів.

3. Інтелектуальна автоматизація як основа майбутніх технологічних платформ. Розвиток цифрових двійників, мультиагентних систем, адаптивних регуляторів, а також предиктивного технічного обслуговування формує основу для так званих «розумних заводів» (smart manufacturing). У цих платформах ШІ забезпечує інтеграцію окремих функціональних блоків у єдину самокеровану систему, яка цілком здатна аналізувати та передбачати зміну технологічних параметрів, самостійно змінювати режими роботи для досягнення оптимуму, формувати рекомендації для персоналу або діяти автономно й інтегрувати виробничі, енергетичні та логістичні ланки в реальному часі. Результати показують, що в умовах високої динаміки зовнішнього середовища (попит, перебої з постачанням, коливання цін на енергоносії) такі системи здатні забезпечити гнучкість і стабільність, недостижні для традиційних методів управління.

4. Вразливі місця. Попри значний потенціал, практичне впровадження засобів ШІ до галузі хімічної інженерії стикається з низкою об'єктивних викликів:

- якість і доступність даних – інтелектуальні моделі є чутливими до повноти, точності та релевантності навчального набору, відсутність якісних даних легко знижує надійність прогнозів;

- проблема «чорної скриньки» – більшість сучасних моделей ШІ досить погано інтерпретуються, що ускладнює їх валідацію та впровадження у критичні технології;

- інтеграція до існуючої інфраструктури – старі технологічні лінії досить часто просто не обладнані необхідними сенсорами та інтерфейсами для взаємодії з сучасними інтелектуальними системами;

- безпека та етика – розробка систем, що приймають рішення без участі людини, вимагає чіткого регулювання, сертифікації та дотримання етичних принципів, які ще не унормовані на законодавчому чи галузевому рівні ані в Україні, ані за кордоном.

Усе це вимагає від дослідників не лише технічної компетентності, але й доволі усвідомленого міждисциплінарного підходу з залученням фахівців із інформаційних технологій (роботи з великими даними), автоматизації, енергетики, управління тощо.

5. Перспективи розвитку. З огляду на глобальні тренди, можна очікувати:

- зростання ролі інтерпретованого ШІ (Explainable AI), що дасть людям змогу глибше аналізувати логіку рішень моделей;
- інтеграцію ШІ з квантовими обчисленнями для розв’язання задач, недоступних більшості класичних методів;
- впровадження роботизованих систем з ШІ у дослідницькі лабораторії, що ледь не повністю автоматизує цикли досліджень та виведення нових продуктів на ринок;
- розвиток відкритих промислових платформ, де різні моделі «виробничих» ШІ будуть доступні через хмарні сервіси й легко інтегруватимуться на підприємствах будь-якого рівня.

Висновки

Завдяки гнучкості та здатності до навчання, ШІ стає невід’ємним інструментом інженерів-хіміків, особливо в умовах цифрової трансформації промисловості. Водночас залишається актуальним завдання забезпечення прозорості, інтерпретованості моделей та гарантій безпеки при їх практичному впровадженні. Вивчення прикладних кейсів демонструє, що штучний інтелект у хімічній інженерії вже досить давно перейшов від етапу теоретичних досліджень до стадії практичного застосування. Алгоритми ШІ не просто гарно інтегруються в усі рівні – від планування й проектування до моніторингу та експлуатації – але й дозволяють швидко і точно моделювати складні процеси, гнучко адаптивно оптимізувати параметри виробництва, вчасно прогнозувати технічний стан обладнання, автоматизувати прийняття рішень та експериментальні дослідження, легко проектувати нові сполуки з заданими властивостями, а також оптимізувати розрахунки.

Інтелектуальні алгоритми не тільки не витісняють числові методи, а навпаки – розширюють їх застосування, додаючи гнучкості, швидкості та можливості працювати з неповними або «зашумленими» даними. Інтеграція ШІ з класичними інструментами забезпечує підвищення точності, адаптивності та ефективності інженерних рішень у складних та динамічних виробничих умовах. Водночас впровадження ШІ актуалізує потребу у високоякісних даних, чітко вибудованих алгоритмах та міждисциплінарній співпраці. Конкурентоспроможність хімічної промисловості вже досить скоро почне визначатися рівнем глобального використання технологій на базі ШІ.

Література

1. Laska M., Karwala I. Artificial Intelligence in the Chemical Industry – Risks and Opportunities. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*. 2023. No. 172. P. 403–416.
2. Rahmani M. Artificial Intelligence in Chemical Engineering and Hydrocarbon Industry, Challenges and Opportunities. *The 18th Iranian National Congress of Chemical Engineering*. Tabriz, Iran, 2024. 15 p.
3. Namdeti R. Artificial Intelligence in Chemical Engineering: Past, Present, and Future Perspectives. *Journal of Chemical Health Risks*. 2023. Vol. 13, No. 6. P. 2051–2061.
4. Zhang D., del Río Chanona E. A. Machine Learning and Hybrid Modelling for Reaction Engineering: Theory and Applications. *Theoretical and Computational Chemistry Series*. No. 26. The Royal Society of Chemistry, 2024. 440 p.
5. Гузьова І. О., Нагурський А. О., Атаманюк В. М. Чисельне моделювання хіміко-технологічних процесів з використанням моделюючої програми ChemCad : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. 136 с.
6. Веретюк О., Андрущак Н. Методи та моделі машинного навчання в хімії та матеріалознавстві на прикладі експерименту з дифузією розчиненої речовини. *Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика*. 2024. Вип. 6, № 1. С. 68–78.

7. Dutta D., Upreti S. R. Artificial Intelligence-Based Process Control in Chemical, Biochemical, and Biomedical Engineering. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2021. Vol. 99. P. 2467–2504.
8. Shen R., Su W. A Review of the Applications of Artificial Intelligence in the Process Analysis and Optimization of Chemical Products. *Pharmaceutical Fronts*. 2023. Vol. 5. P. 219–226.
9. Roh J., Park H., Kwon H. et al. Interpretable Machine Learning Framework for Catalyst Performance Prediction and Validation with Dry Reforming of Methane. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2023. Vol. 343. 123454.
10. Srivastava S., Varshney B., Sharma V. P. et al. Applications of Artificial Intelligence in Polymer Manufacturing. *Application of Artificial Intelligence in New Materials Discovery*. *Materials Research Foundations*. 2023. Vol. 147. P. 105–122.
11. Lu Y., Liu C., I-Kai Wang K. et al. Digital Twin-Driven Smart Manufacturing: Connotation, Reference Model, Applications and Research Issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 61. 101837.
12. Wang J., Xu C., Zhang J. et al. Big Data Analytics for Intelligent Manufacturing Systems: A Review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 62. P. 738–752.
13. Sharma N., Liu Y. A. A Hybrid Science-Guided Machine Learning Approach for Modeling Chemical Processes: A Review. *AIChE Journal*. 2022. Vol. 68, article 17609.
14. Aghbashlo M., Peng W., Tabatabaei M. et al. Machine Learning Technology in Biodiesel Research: A Review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2021. Vol. 85. 100904.
15. Cauvin S., Celse B. CHEM: Advanced Decision Support Systems for Chemical/Petrochemical Process Industries. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2004. Vol. 18. P. 1027–1032.
16. Ruiz D., Casas A., Escobar C. A. et al. Advanced Machine Learning Techniques for Corrosion Rate Estimation and Prediction in Industrial Cooling Water Pipelines. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 11. 3564.
17. Abuwatfa W. H., AlSawaftah N., Darwish N. et al. A Review on Membrane Fouling Prediction Using Artificial Neural Networks (ANNs). *Membranes*. 2023. Vol. 13, No. 7. 685.
18. Ukawa C., Yamashita Y. Fault Detection and Diagnosis for Chemical Processes Based on Deep Neural Networks with Continuous Wavelet Transform. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2023. Vol. 52. P. 1681–1686.
19. Jablonka K. M., Ongari D., Moosavi S. M. et al. Big-Data Science in Porous Materials: Materials Genomics and Machine Learning. *Chemical Reviews*. 2020. Vol. 49, No. 22. P. 8066–8129.
20. Wang G., Xuefei W., Bo X. et al. Machine Learning in Unmanned Systems for Chemical Synthesis. *Molecules*. 2023. Vol. 28, No. 5. 2232.
21. Wang C., Wang W., Sun Y. et al. Hybrid Modeling of Methanol to Olefin Fluidized Bed Reactor Corrected by Artificial Neural Network. *Chemical Engineering Science*. 2025. Vol. 307. 121323.
22. Albino M., Gargalo C. L., Nadal-Rey G. et al. Hybrid Modeling for On-Line Fermentation Optimization and Scale-Up: A Review. *Processes*. 2024. Vol. 12, No. 1635.
23. Liu L., Tan F., Wu Z. et al. Combining Genetic Algorithm and Deep Learning to Optimize a Chemical Kinetic Mechanism of Ammonia Under High Pressure. *Fuel*. 2024. Vol. 360. 130508.
24. Pai S. M., Shah K. A., Sunder S. et al. Machine Learning Applied to the Design and Optimization of Polymeric Materials: A Review. *Next Materials*. 2025. Vol. 7. 100449.

25. Ilyunin O., Bezsonov O., Rudenko S. et al. The Neural Network Approach for Estimation of Heat Transfer Coefficient in Heat Exchangers Considering the Fouling Formation Dynamic. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024. Vol. 51. 102615.
26. Patil A., Soni G., Prakash A. A BMFO-KNN Based Intelligent Fault Detection Approach for Reciprocating Compressor. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2021. Vol. 13. P. 797–809.
27. Singh V., Kodamana H. Reinforcement Learning Based Control of Batch Polymerisation Processes. *IFAC-PapersOnLine*. 2020. Vol. 53, Iss. 1. P. 667–672.
28. Yu X., Yang J., Meng X. et al. Event-Triggered Adaptive NN Practical Finite-Time Control with its Application to MPCVD Reactors. *Journal of the Franklin Institute*. 2023. Vol. 360, Iss. 3. P. 1870–1883.
29. Stokes J. M., Yang K., Swanson K. et al. A Deep Learning Approach to Antibiotic Discovery. *Cell*. 2020. Vol. 180, Iss. 4. P. 688–702.
30. Jain A., Ong S. P., Hautier G. et al. Commentary: The Materials Project: A Materials Genome Approach to Accelerating Materials Innovation. *APL Materials*. 2013. Vol. 1, No. 1. 011002.
31. Alzaid S. S., Alkahtani B. S. T., Chandan K. et al. Transient Thermal Distribution in a Wavy Fin Using Finite Difference Approximation Based Physics Informed Neural Network. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2024. Vol. 141, Iss. 3. P. 2555–2574.
32. Wang H., Yin Y., Hui X. Y. et al. Prediction of Effective Diffusivity of Porous Media Using Deep Learning Method Based on Sample Structure Information Self-Amplification. *Energy and AI*. 2020. Vol. 2. 100035.
33. Lin Y. T., Feng S., Hlavacek W. Scaling Methods for Accelerating Kinetic Monte Carlo Simulations of Chemical Reaction Networks. *The Journal of Chemical Physics*. 2019. Vol. 150. 244101.
34. Faber R., Arellano-Garcia H., Wozny G. A Hybrid Optimization Approach to Parameter Estimation. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2007. Vol. 24. P. 75–80.
35. Atuonwu J. C. A Simulation Tool for Pinch Analysis and Heat Exchanger/Heat Pump Integration in Industrial Processes: Development and Application in Challenge-Based Learning. *Education for Chemical Engineers*. 2025. Vol. 52. P. 141–150.
36. Vrba P. Review of Industrial Applications of Multi-Agent Technologies. *Studies in Computational Intelligence*. 2013. Vol. 472. P. 327–338.
37. Aminzadeh A., Karganroudi S. S., Majidi S. et al. A Machine Learning Implementation to Predictive Maintenance and Monitoring of Industrial Compressors. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 4. 1006.

Bibliography (transliterated)

1. Laska M., Karwala I. Artificial Intelligence in the Chemical Industry – Risks and Opportunities. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*. 2023. No. 172. P. 403–416.
2. Rahmani M. Artificial Intelligence in Chemical Engineering and Hydrocarbon Industry, Challenges and Opportunities. *The 18th Iranian National Congress of Chemical Engineering*. Tabriz, Iran, 2024. 15 p.
3. Namdeti R. Artificial Intelligence in Chemical Engineering: Past, Present, and Future Perspectives. *Journal of Chemical Health Risks*. 2023. Vol. 13, No. 6. P. 2051–2061.
4. Zhang D., del Río Chanona E. A. Machine Learning and Hybrid Modelling for Reaction Engineering: Theory and Applications. Theoretical and Computational Chemistry Series. No. 26. *The Royal Society of Chemistry*, 2024. 440 p.

5. Huzova I. O., Nahurskyi A. O., Atamaniuk V. M. Chyselne modeliuvannia khimiko-tehnologichnykh protsesiv z vykorystanniam modeliuiuchoi prohramy ChemCad : navch. posib. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, 2021. 136 p.
6. Veretiuk O., Andrushchak N. Metody ta modeli mashynnoho navchannia v khimii ta materialoznavstvi na prykladi eksperymentu z dyfuziieiu rozchynenoï rehovyny. *Kompiuterni systemy proektuvannia. Teoriia i praktyka*. 2024. Vyp. 6, No. 1. P. 68–78.
7. Dutta D., Upreti S. R. Artificial Intelligence-Based Process Control in Chemical, Biochemical, and Biomedical Engineering. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2021. Vol. 99. P. 2467–2504.
8. Shen R., Su W. A Review of the Applications of Artificial Intelligence in the Process Analysis and Optimization of Chemical Products. *Pharmaceutical Fronts*. 2023. Vol. 5. P. 219–226.
9. Roh J., Park H., Kwon H. et al. Interpretable Machine Learning Framework for Catalyst Performance Prediction and Validation with Dry Reforming of Methane. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2023. Vol. 343, Article 123454.
10. Srivastava S., Varshney B., Sharma V. P. et al. Applications of Artificial Intelligence in Polymer Manufacturing. *Application of Artificial Intelligence in New Materials Discovery. Materials Research Foundations*. 2023. Vol. 147. P. 105–122.
11. Lu Y., Liu C., I-Kai Wang K. et al. Digital Twin-Driven Smart Manufacturing: Connotation, Reference Model, Applications and Research Issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 61, Article 101837.
12. Wang J., Xu C., Zhang J. et al. Big Data Analytics for Intelligent Manufacturing Systems: A Review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 62. P. 738–752.
13. Sharma N., Liu Y. A. A Hybrid Science-Guided Machine Learning Approach for Modeling Chemical Processes: A Review. *AIChE Journal*. 2022. Vol. 68, Article 17609.
14. Aghbashlo M., Peng W., Tabatabaei M. et al. Machine Learning Technology in Biodiesel Research: A Review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2021. Vol. 85, Article 100904.
15. Cauvin S., Celse B. CHEM: Advanced Decision Support Systems for Chemical/Petrochemical Process Industries. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2004. Vol. 18. P. 1027–1032.
16. Ruiz D., Casas A., Escobar C. A. et al. Advanced Machine Learning Techniques for Corrosion Rate Estimation and Prediction in Industrial Cooling Water Pipelines. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 11, Article 3564.
17. Abuwatfa W. H., AlSawaftah N., Darwish N. et al. A Review on Membrane Fouling Prediction Using Artificial Neural Networks (ANNs). *Membranes*. 2023. Vol. 13, No. 7, Article 685.
18. Ukawa C., Yamashita Y. Fault Detection and Diagnosis for Chemical Processes Based on Deep Neural Networks with Continuous Wavelet Transform. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2023. Vol. 52. P. 1681–1686.
19. Jablonka K. M., Ongari D., Moosavi S. M. et al. Big-Data Science in Porous Materials: Materials Genomics and Machine Learning. *Chemical Reviews*. 2020. Vol. 49, No. 22. P. 8066–8129.
20. Wang G., Xuefei W., Bo X. et al. Machine Learning in Unmanned Systems for Chemical Synthesis. *Molecules*. 2023. Vol. 28, No. 5, Article 2232.
21. Wang C., Wang W., Sun Y. et al. Hybrid Modeling of Methanol to Olefin Fluidized Bed Reactor Corrected by Artificial Neural Network. *Chemical Engineering Science*. 2025. Vol. 307, Article 121323.
22. Albino M., Gargalo C. L., Nadal-Rey G. et al. Hybrid Modeling for On-Line Fermentation Optimization and Scale-Up: A Review. *Processes*. 2024. Vol. 12, Article 1635.

23. Liu L., Tan F., Wu Z. et al. Combining Genetic Algorithm and Deep Learning to Optimize a Chemical Kinetic Mechanism of Ammonia Under High Pressure. *Fuel*. 2024. Vol. 360, Article 130508.
24. Pai S. M., Shah K. A., Sunder S. et al. Machine Learning Applied to the Design and Optimization of Polymeric Materials: A Review. *Next Materials*. 2025. Vol. 7, Article 100449.
25. Ilyunin O., Bezsonov O., Rudenko S. et al. The Neural Network Approach for Estimation of Heat Transfer Coefficient in Heat Exchangers Considering the Fouling Formation Dynamic. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024. Vol. 51, Article 102615.
26. Patil A., Soni G., Prakash A. A BMFO-KNN Based Intelligent Fault Detection Approach for Reciprocating Compressor. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2021. Vol. 13. P. 797–809.
27. Singh V., Kodamana H. Reinforcement Learning Based Control of Batch Polymerisation Processes. *IFAC-PapersOnLine*. 2020. Vol. 53, Iss. 1. P. 667–672.
28. Yu X., Yang J., Meng X. et al. Event-Triggered Adaptive NN Practical Finite-Time Control with its Application to MPCVD Reactors. *Journal of the Franklin Institute*. 2023. Vol. 360, Iss. 3. P. 1870–1883.
29. Stokes J. M., Yang K., Swanson K. et al. A Deep Learning Approach to Antibiotic Discovery. *Cell*. 2020. Vol. 180, Iss. 4. P. 688–702.
30. Jain A., Ong S. P., Hautier G. et al. Commentary: The Materials Project: A Materials Genome Approach to Accelerating Materials Innovation. *APL Materials*. 2013. Vol. 1, No. 1, Article 011002.
31. Alzaid S. S., Alkahtani B. S. T., Chandan K. et al. Transient Thermal Distribution in a Wavy Fin Using Finite Difference Approximation Based Physics Informed Neural Network. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2024. Vol. 141, Iss. 3. P. 2555–2574.
32. Wang H., Yin Y., Hui X. Y. et al. Prediction of Effective Diffusivity of Porous Media Using Deep Learning Method Based on Sample Structure Information Self-Amplification. *Energy and AI*. 2020. Vol. 2, Article 100035.
33. Lin Y. T., Feng S., Hlavacek W. Scaling Methods for Accelerating Kinetic Monte Carlo Simulations of Chemical Reaction Networks. *The Journal of Chemical Physics*. 2019. Vol. 150, Article 244101.
34. Faber R., Arellano-Garcia H., Wozny G. A Hybrid Optimization Approach to Parameter Estimation. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2007. Vol. 24. P. 75–80.
35. Atuonwu J. C. A Simulation Tool for Pinch Analysis and Heat Exchanger/Heat Pump Integration in Industrial Processes: Development and Application in Challenge-Based Learning. *Education for Chemical Engineers*. 2025. Vol. 52. P. 141–150.
36. Vrba P. Review of Industrial Applications of Multi-Agent Technologies. *Studies in Computational Intelligence*. 2013. Vol. 472. P. 327–338.
37. Aminzadeh A., Karganroudi S. S., Majidi S. et al. A Machine Learning Implementation to Predictive Maintenance and Monitoring of Industrial Compressors. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 4, Article 1006.

УДК 66.02/.03:519.7

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, професор,
А. М. Миронов, канд .техн. наук, доцент, М. В. Ільченко, канд .техн. наук, доцент,
М. М. Козуля, канд .техн. наук, доцент, В. К. Горбунов, студент

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ЯК ІНСТРУМЕНТ ХІМІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ: АНАЛІЗ, МОДЕЛЮВАННЯ, ЧИСЛОВІ МЕТОДИ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ІНТЕГРАЦІЯ

У статті розглянуто сучасні напрями застосування штучного інтелекту (ШІ) у хімічній інженерії як потужного інструмента для вирішення широкого спектра дослідницьких та інженерно-технологічних задач. Зроблено акцент на системній інтеграції ШІ з числовими методами, математичним моделюванням, оптимізацією технологічних процесів та автоматизованим управлінням промисловим обладнанням. Здійснено огляд сучасної літератури, який підтверджує актуальність теми, зростання наукового інтересу до машинного навчання та глибоких нейронних мереж у прикладних хімічних задачах, а також зміщення парадигми моделювання – від аналітичних рівнянь до гібридних, інтерпретованих моделей, що враховують обидві методології. Наведено численні приклади ефективного використання ШІ для побудови імітаційних моделей, розв’язання обернених задач, передбачення властивостей матеріалів, оптимізації сировинного складу та прогнозування технічного стану обладнання. Показано, що нейромережеві моделі здатні у десятки разів прискорити чисельні розрахунки та підвищити їх точність.

Окрему увагу приділено концепції «розумного заводу» – як нового рівня інтеграції виробничих систем, в якому ШІ виконує роль координаційного центру між логістичними, енергетичними та технологічними підсистемами. Також проаналізовано здобутки у галузі створення цифрових двійників хімічних установок, мультиагентних систем і платформ підтримки прийняття рішень у режимі реального часу. Встановлено, що ефективність застосування ШІ значно зростає при поєднанні з класичними числовими алгоритмами. Обґрунтовано переваги гібридного підходу, при якому наукові знання доповнюють машинне навчання, а МН – компенсує недоліки фізико-хімічних моделей у випадках складних, неповних чи нестабільних вхідних даних. Виокремлено типові проблеми: недостатня інтерпретованість моделей, обмеженість доступу до якісних вхідних даних, технічні обмеження існуючих виробничих ліній та потреба в стандартизації ШІ-інструментів у критичних технологіях.

Зроблено висновок про те, що ШІ вже перейшов межу суто академічного інтересу й став рушієм глибоких трансформацій у проєктуванні, експлуатації, оптимізації й управлінні хімічними виробництвами. Акцентовано, що майбутня конкурентоспроможність хімічної інженерії залежатиме від здатності підприємств впроваджувати адаптивні, інтерпретовані та безпечні ШІ-рішення на всіх етапах життєвого циклу продукту – від ідеї до утилізації.

Ключові слова: штучний інтелект, хімічна інженерія, інформаційні технології, ШІ, математичне моделювання, імітаційна модель, інтеграція, оптимізація, симуляція.

L. L. Tovazhnyanskyy, A. M. Myronov, M. V. Ilchenko, M. M. Kozulia, V. K. Gorbunov

**ARTIFICIAL INTELLIGENCE AS A TOOL FOR CHEMICAL ENGINEERING:
ANALYSIS, MODELLING, NUMERICAL METHODS, OPTIMIZATION,
INTEGRATION**

This article explores contemporary approaches to the application of artificial intelligence (AI) in chemical engineering as a powerful tool for solving a wide range of research and industrial challenges. The paper emphasizes the systematic integration of AI with numerical methods, mathematical and simulation modeling, process optimization, and automated control of industrial systems. A comprehensive literature review confirms the high relevance of this topic and the growing scientific interest in machine learning and deep neural networks for applied chemical tasks. The paradigm of chemical process modeling is shifting from rigid analytical equations toward hybrid, interpretable AI-enhanced models. The article presents numerous real-world examples of AI being used to construct simulation models, solve inverse problems, forecast material properties, optimize feedstock composition, and predict equipment failures. Neural network models have been shown to accelerate numerical simulations by an order of magnitude while significantly improving accuracy.

Special attention is paid to the «smart factory» concept, which embodies a new level of technological integration, where AI coordinates the interaction between logistics, energy, and production subsystems. The study also highlights advancements in the creation of digital twins for chemical plants, multi-agent systems, and decision-support platforms operating in real time. It is shown that AI becomes especially effective when combined with classical numerical algorithms. The paper substantiates the benefits of the hybrid approach, where domain knowledge complements machine learning, while ML compensates for the limitations of traditional physicochemical models under conditions of incomplete or unstable input data. The study identifies key challenges in the field, such as the limited interpretability of black-box models, insufficient access to high-quality training data, outdated production infrastructure, and the absence of standardized AI protocols for critical industrial technologies.

The findings confirm that AI has moved beyond purely academic interest to become a core driver of transformation in process design, optimization, equipment monitoring, and control systems in chemical engineering. The paper concludes that the future competitiveness of the chemical industry will depend on its ability to implement adaptive, interpretable, and secure AI-driven solutions across all stages of the product lifecycle – from conceptualization to end-of-life management. These solutions offer a pathway to more sustainable, flexible, and efficient production systems in the age of digital transformation.

Keywords: artificial intelligence, chemical engineering, information technology, AI, mathematical modeling, simulation model, integration, optimization, simulation.

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, професор,
Ю. А. СЕЛІХОВ, канд. техн. наук, професор, К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, професор,
А. М. МИРОНОВ, канд. техн. наук, доцент, М. В. ІЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент,
Г. В. ПОНОМАРЕНКО, канд. техн. наук, доцент

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ У МІСЬКОМУ ПРИРОДОКОРИСТУВАННІ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: моделювання, прогнозування, екологічна безпека, розрахункове прогнозування, забруднення повітря, промислові підприємства, міське природокористування, навколишнє природне середовище, здоров'я людини, викиди, шкідливі речовини, нормовані величини, гранично допустимі концентрації (ГДК), технологічні та вентиляційні викиди, забруднення, роза вітрів, природні ресурси, енергія природи, механізми самоочищення.

Постановка завдання. Прийнятий 28 лютого 2019 року Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» визначив нові цілі та завдання в галузі охорони навколишнього середовища. Він поставив стратегічні цілі державної екологічної політики, виявив причини екологічних проблем в Україні та фінансові можливості реконструкції довкілля країни [1, 2].

Ці закони повинні поліпшити навколишнє середовище України до 2030 року. Поставлені цілі полягають у: зменшенні антропогенного впливу на довкілля, ліквідації причин та ризиків негативних явищ на здоров'я та благополуччя людей; впровадження в експлуатацію нової системи екологічного управління, забезпеченні екологічно збалансованого природокористування. Документи відповідають європейським екологічним стандартам життя.

До сучасних екологічних проблем належать:

- виснаження природних ресурсів (корисних копалин, земельних ресурсів, лісів, прісної води та ін.);
- забруднення навколишнього природного середовища (атмосферного повітря, Світового океану, ґрунтів);
- втрата біорізноманіття.

В Україні як у будь-якому промисловому регіоні зі значною концентрацією промислових, хімічних, енергетичних та інших виробництв, значним рівнем аграрного освоєння земель, є інтенсивний техногенний вплив на довкілля. В атмосферу щорічно викидається близько 12 млн.т різних сполук, у поверхневі води надходить 15–20 млрд. м³ стічних вод тощо. Важкі метали накопичуються у ґрунтах переважно біля підприємств чорної та кольорової металургії (близько 35 %), теплових електростанцій (27 %), підприємств з видобутку і переробки нафти (16 %), транспортних магістралей (13 %), підприємств з видобутку та виробництва будівельних матеріалів (8 %). Хімічне забруднення ґрунтів відбувається, в основному, через атмосферу шляхом осадження викидів шкідливих речовин з котелень, автотранспорту тощо, у тому числі, атмосферних опадів, парів, аерозолів, пилу.

Надмірне виснаження ресурсів і забруднення навколишнього природного середовища спричинили загострення кількох негативних процесів глобального масштабу – утворення і розростання озонових дір, формування парникового ефекту, появу кислотних дощів, що призводить до глобальних змін клімату і, в наслідок цього, до природних катастроф. Щорічні випадання кислотних дощів завдають великої шкоди екосистемі за рахунок виснаження ґрунтів, пригнічення росту рослин та зменшення органічного світу водойм. Причиною їх утворення є реакція води, що міститься в атмосфері, з діоксидом сірки (SO_2) та оксидами азоту (NO_x) і наступним утворенням кислот. Ці забруднюючі речовини потрапляють в атмосферне повітря в результаті роботи теплових електростанцій, металургійних та хімічних підприємств, викидів автотранспорту та ін. Кислотні дощі стали дуже поширеним явищем, причому вони можуть випадати на відстані багатьох сотень і тисяч кілометрів від джерела первісного викидання речовини. Кислотні дощі призвели до закислення природного середовища на великих територіях Європи та Північної Америки. Кислотні дощі залишають на листі дерев чорні плями, закислюють озера і ґрунти, змінюють їхній хімічний склад. Кислотні опади посилюють корозію різних матеріалів і конструкцій. Особливо небезпечні вони для унікальних історичних пам'яток, зокрема мармурових [3].

Через зменшення концентрації озону у стратосфері відбувається виснаження озонового шару, що дає змогу вільно проникати на поверхню Землі ультрафіолетовому випромінюванню, шкідливому для живих організмів. Основною причиною руйнування озонового шару є викиди хлорфторвуглеводнів, гідрохлорфторвуглеводнів і легких органічних сполук від автомобільних вихлопів, побічних продуктів промислових процесів, використання холодоагентів та аерозолів. Молекули озону в верхніх шарах стратосфери розпадаються, реагуючи з хлором, фтором та бромом, які містяться у шкідливих викидах [4].

Збільшення в атмосфері газів та сполук, які не пропускають сонячні промені, відбиті від земної поверхні, стало причиною посилення парникового ефекту. За даними Міжурядової комісії з кліматичних змін при ООН, впродовж століття температура на Землі може підвищитися на 3,5 °C. Навіть незначна зміна температури може спричинити зміни напрямків вітру та течій океану, підвищити рівень моря тощо, що змінить існуючі кліматичні умови і може призвести до непередбачуваних наслідків. До основних парникових газів належать: діоксид вуглецю, метан, оксид азоту (I), водяна пара, а також різні хлорфторвуглеводні [5, 6].

Процеси здійснення реформ та європейської інтеграції вимагають від України нових рішень та практичних кроків, спрямованих на формування екологічно безпечного довкілля. Вплив енергетичного сектора на стале економічне зростання з точки зору довкілля, клімату та безпеки зумовили необхідність продовження програм розвитку відновлюваних джерел енергії та підтримки проектів з енергоефективності, збереження ресурсів та впровадження більш чистих технологій виробництва [7, 8].

Більше третини загального обсягу шкідливих викидів в атмосферу дає автотранспорт – 6,5 млн. тонн на рік. В Ужгороді згаданий показник складає 91 % від загальної кількості викидів. Встановлено два нормативи забруднення повітря, максимально-разова і середньодобова гранично допустима концентрація (ГДК). Максимально-разова ГДК необхідна для попередження рефлекторних реакцій у людини (відчуття запаху, зміни біоелектричної активності головного мозку, світлової чутливості очей тощо) при короткотривалому впливі забруднювачів (до 20 хв), а середньодобова – з метою попередження їхнього загально токсичного, канцерогенного, мутагенного та ін. впливу. Для оцінки впливу забруднювачів на здоров'я населення потрібно користуватися не лише максимально-разовими і середньодобови-

ми ГДК, які регламентують вміст хімічних речовин у повітрі населених пунктів, але й показниками, які характеризують вміст шкідливих речовин за тривалий період (місяць, рік). Підставою для цього є те, що невеликі концентрації речовин при тривалій дії справляють такий же негативний ефект, як і висока концентрація за короткий проміжок часу. Встановлено, що довготривале забруднення атмосферного повітря сірчаним газом, окисами вуглецю, азоту та іншими речовинами шкідливо впливає на здоров'я людей [9, 10]. При цьому може збільшуватися загальна захворюваність населення, обумовлена ураженням окремих органів і систем організму. На території України функціонує більше 1500 підприємств, що викидають в атмосферу шкідливі речовини. Загальна кількість відходів щороку збільшується на 12 млн. тонн.

Перш ніж проектувати, будувати і реконструювати промислові підприємства, необхідно визначити, якою мірою викиди даного виробничого об'єкта створять первинні або додаткові забруднення повітря, що вже є, в межах нормованих величин гранично допустимих концентрацій (ГДК). При розрахунковому прогнозуванні рівня забруднення повітря біля промислового підприємства у прилеглому житловому районі необхідно враховувати всі викиди, тобто. не лише технологічні, а й вентиляційні. Забруднення повітряного басейну становить загрозу здоров'ю людини та всьому навколишньому середовищу [11]. Захист атмосферного повітря є однією з найбільш актуальних проблем в сучасному суспільстві, оскільки науково-технічний прогрес і розширення виробництва пов'язане зі зростанням негативних антропогенних впливів на атмосферу.

Тому, моделювання екологічної безпеки довкілля у міському природокористуванні є дуже актуальним завданням.

Мета статті. Зробити розрахунок викидів шкідливих речовин в навколишнє природне середовище з лінійного джерела викиду в якості моделювання і прогнозування забруднення повітряного басейну та прилеглих ґрунтів навколо промислового підприємства у міському природокористуванні.

Велика кількість промислових підприємств знаходиться в зонах міського природокористування. Тому всі викиди шкідливих речовин, які вилітають з точкових або лінійних джерел викиду більшими своїми частинами осаждаються на деревах, будинках, ґрунтах. Подолання сучасних екологічних проблем є неможливим без застосування моделювання і прогнозування екологічної безпеки довкілля методиками розрахунків викидів шкідливих речовин в навколишнє природне середовище. Впровадження цих методик розрахунків спрямоване на значне зменшення негативного впливу на атмосферу міського природокористування в цілому з одночасним раціональнішим використанням природних ресурсів і енергії. Збільшення кількостей забруднюючих речовин в атмосфері міст не дає можливостей розсіювання викидів, тому викиди накопичуються навколо промислових підприємств. А здатність атмосфери до самоочищення, яке відбувається за рахунок протікання фізико-хімічних процесів між компонентами забруднювачів і компонентами самої атмосфери обмежується, особливо зі збільшеннями масштабів її забруднення [12].

Наприклад, розглянемо такий варіант розрахунку за сприятливих метеорологічних умов [11].

На даху вузького будинку (див. рис. 1) розташований аераційний ліхтар, через який видаляється вентиляційне повітря, що містить шкідливі речовини (ШР) – оксид вуглецю. Об'єм повітря, що видаляється V_f ($\text{м}^3/\text{г}$). Температура повітря, що видаляється, вища за зовнішню температуру повітря. Потрібно визначити концентрацію ШР в

єдиній циркуляційній зоні і на відстані x (м) від завітреної стіни при напрямі вітру, перпендикулярному подовжній осі будівлі.

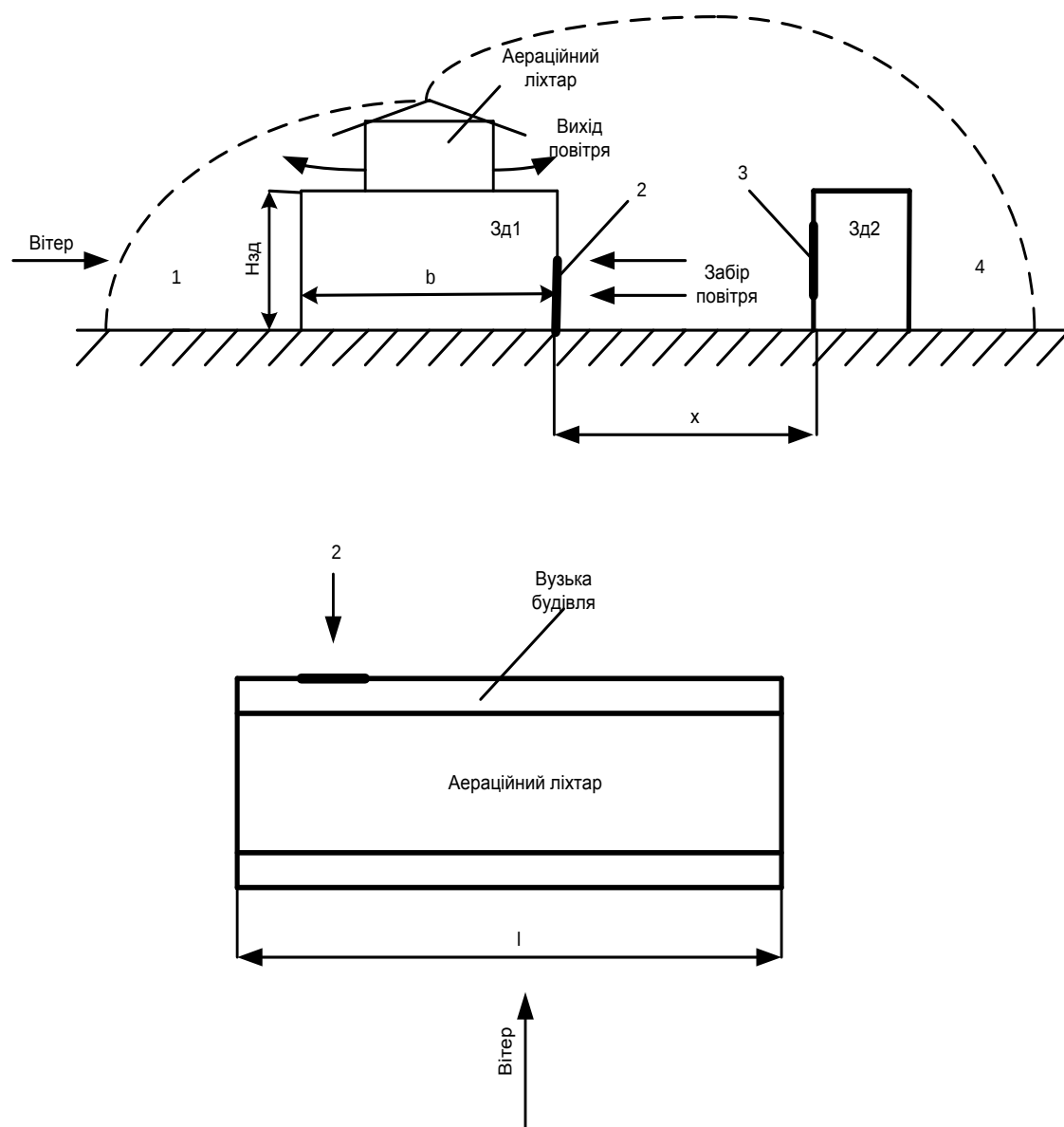


Рисунок 1 – Схема розташування лінійного джерела (аераційний ліхтар),
1 – зона підпору; 2 – решітка припливної вентиляції Зд1, 3 – решітка припливної вентиляції Зд2; 4 – єдина циркуляційна зона

Визначаємо відношення ширини будинку до його висоти: якщо $b/H_{зд} < 2,5$, значить, будинок вузький; якщо $l/H_{зд} < 10$, значить, будинок короткий.

Масову витрату оксиду вуглецю визначають виходячи з середньої концентрації в повітрі, що видаляється, мг/с

$$M = V_f \cdot c_{clf}, \quad (1)$$

де V_f – об'єм ГПС, що викидається через ліхтар, м³/с, c_{clf} – середня концентрація в повітрі, що видаляється, мг/м³.

Лінійне джерело (аераційний ліхтар) розташовано в єдиній циркуляційній зоні. Надмірне тепло, (Вт), що міститься в повітрі, яке виходить через ліхтар, знаходимо за формулою:

$$Q = V_f \cdot c_p (t_u - t_0), \quad (2)$$

де c_p – об'ємна теплоємність оксиду вуглецю при середній температурі повітря. Приймаємо, що $c_p = 1250$ кДж/(м³·К) – постійна величина.

Небезпечну швидкість вітру, м/с, знаходимо за формулою:

$$u_m = 0,93 \cdot \varphi \cdot \sqrt[3]{\frac{Q}{H_z}}, \quad (3)$$

де за методикою для ліхтарів, розташованих в зоні аеродинамічної тіні, $\varphi = 1$.

Концентрація оксиду вуглецю, (мг/м³), у приземному повітрі єдиної циркуляційної зони визначається за формулою:

$$c = \frac{2 \cdot M}{n_c \cdot u_m \cdot l \cdot H_z}. \quad (4)$$

Для вузького будинку, що окремо стоїть, коефіцієнт $n_c = 1$.

При $x > 6 \cdot H_z$ концентрація оксиду вуглецю, (мг/м³), на відстані x (м) від завітреної стіни визначається за формулою:

$$c = \frac{7,2 \cdot M}{u_m \cdot l \cdot (b + x)}. \quad (5)$$

Максимальна концентрація оксиду вуглецю, (мг/м³), у приземному повітрі циркуляційної зони визначається за формулою:

$$c_m = \frac{2,9 \cdot K_{Lf} \cdot \frac{M}{l_f}}{2,25 \cdot Q^{1/3} \cdot H_z^{2/3} + 2,9 \cdot K_{Lf} \cdot \frac{L_f}{(l_f \cdot 3600)}}. \quad (6)$$

Коефіцієнт K_{Lf} знаходимо за таблицею 1.

Таблиця 1 – Коефіцієнт K_{Lf}

l/H_z	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_{Lf}	0,9	1	1,15	1,3	1,45	1,65	1,8	2,1	2,2

Проміжні значення параметрів визначають методами інтерполяції.

Концентрацію шкідливої речовини, (мг/м³), на решітці 2 припливної вентиляції Зд 1 (див. рис. 1), визначаємо за формулою:

$$c_{f2} = 0,6 \cdot c_{mf} . \quad (7)$$

Вважаємо, що приземна концентрація $c(x)$ шкідливих речовин (ШР) у атмосфері на різних відстанях за всією шириною лінійного джерела викиду визначається за формулою: $c(x) = c_{mf} \cdot sn(x)$. Значення для першої ділянки ($x/x_m \leq 1$) визначається залежністю:

$$sn1(x) = 0,125 \cdot (10 - H_z) + 0,125 \cdot (H_z - 2) \cdot s1(x) , \quad (8)$$

$$\text{де } s1(x) = 3 \cdot (x/x_m)^4 - 8 \cdot (x/x_m)^3 + 6 \cdot (x/x_m)^2 . \quad (9)$$

Визначаємо $x_m = 3 \cdot H_{z1}$ та значення $sn2(x)$ для другої ділянки, коли $1 < (x/x_m) \leq 8$:

$$sn2(x) = \frac{1,13}{0,13 \cdot \left(\frac{x}{x_m}\right)^2 + 1} . \quad (10)$$

Не слід забувати, що за формулою (4) визначається усереднене значення концентрації забруднень в єдиній циркуляційній зоні. Найбільша концентрація ШР виявляється на завітреній стіні. Розрахована за формулою (5) концентрація є максимальною і знаходиться на відстані $3 \cdot H_z$ від завітреної стіни. Концентрація оксиду вуглецю на відстані x (м) від завітреної стіни визначається за формулою:

$$c_{f3} = c_{mf} \cdot sn2(x) . \quad (11)$$

Після розрахунків концентрацій ШР було графічно представлено розподіл ШР від лінійного джерела у приземному повітрі.

Початкові дані для розрахунку представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Початкові дані для розрахунку

№ п/п	l_f , м	b , м	H_{z1} , м	x , м	V_f , м ³ /с	c_f , мг/м ³	t_u , °С	t_0 , °С	ГДК ₃ , мг/м ³
1	100	24	18	70	139	1,4	35	30	0,011

Реалізація алгоритму розрахунку за наведеними формулами в середовищі MathCAD [13]

Таблиця 3 – Список ідентифікаторів

Позначення у тексті	Ідентифікатор
Довжина будівлі 1, l_f	lf
Ширина будівлі 1, b_1	b1
Висота будівлі 1, H_{z1}	Hz1
Відстань між будинками, x	x
Об'єм ГПС, що викидається через ліхтар, V_f	Vf
Концентрація ШР, що викидається ліхтарем, c_f	Cf
Гранично допустима концентрація ШР, ГДК	PDK
Масова витрата ШР, що викидається через ліхтар M_f	Mf
Коефіцієнт, K_{lf}	Klf
Максимальна концентрація ШР, що викидається через ліхтар, c_{mf}	Cmf
Концентрація ШР у точці 2, c_{f2}	Cf2
Концентрація ШР у точці 3, c_{f3}	Cf3

Введення початкових даних

$C_p := 1250$ $V_f := 139$ $H_z := 18$ $l := 100$ $b_z := 24$
 $x := 70$ $t_u := 35$ $t_0 := 30$ $C_f := 1.4$ $PDK := 0.011$

Ліхтар

Тепло, що йде через ліхтар, Q, кВт $Q := \frac{\left(\frac{V_f}{l}\right) \cdot C_p \cdot (t_u - t_0)}{1000} = 8.687$

Відносна довжина будівлі $ot1$ $ot1 := \frac{l}{H_z} = 5.556$

Коефіцієнт, що враховує розміри будівлі Klf (табл. 2.1) $Klf := 1.4$

Масова витрата ШР, що викидаються з одного погонного метра ліхтаря Mf $Mf := \frac{V_f \cdot C_f}{l} = 1.946$

Максимальна концентрація шкідливих речовин, Cmf

$$Cmf := \frac{2.9 \cdot Klf \cdot Mf}{2.25 \cdot Q^{\frac{1}{3}} \cdot H_z^{\frac{2}{3}} + 2.9 \cdot Klf \cdot V_f} = 0.013$$

Вважаємо, що приземна концентрація $c(x)$ шкідливих речовин (ШР) в атмосфері на різних відстанях по всій ширині лінійного джерела викиду визначається за формулою:

$$C(x) = Cmf \cdot su(x)$$

Значення $su1(x)$ для першої ділянки ($x/xm \leq 1$) визначається залежністю:

$$xm := 3 \cdot Hz = 54$$

$$s1(x) := 3 \cdot \left(\frac{x}{xm}\right)^4 - 8 \cdot \left(\frac{x}{xm}\right)^3 + 6 \cdot \left(\frac{x}{xm}\right)^2$$

$$su1(x) := [0.125 \cdot (10 - Hz) + 0.125 \cdot (Hz - 2)] \cdot s1(x)$$

Значення $su2(x)$ для другої ділянки, коли $1 < (x/xm) \leq 10$:

$$su2(x) := \exp\left[-0.1 \cdot \left(\frac{x}{xm} - 3\right)\right]$$

Концентрація в точці 2 Cf2

$$\begin{aligned} x := 0 & \quad C2 := Cmf \cdot su1(x) & C2 = 0 \\ x := 70 & \quad Cf(x) := Cmf \cdot su2(x) & Cf(x) = 0.012 \end{aligned}$$

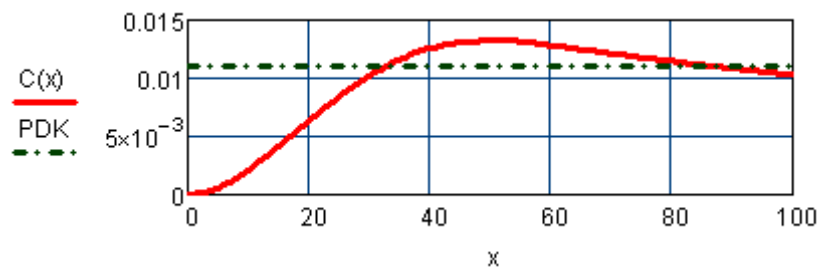
Концентрація ШР на відстані x

$$su(x) := \begin{cases} su1(x) & \text{if } \frac{x}{xm} < 1 \\ su2(x) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Графічне відображення розподілу концентрації шкідливих викидів лінійного джерела в приземному повітрі

Визначаємо значення $su(x)$ для всього діапазону зміни x

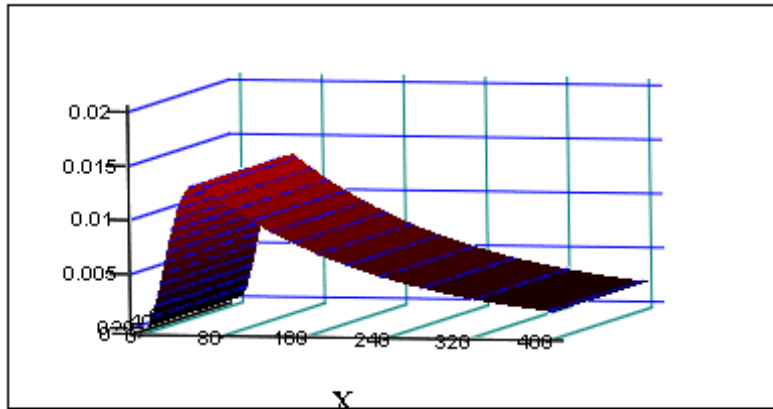
$$C(x) := Cmf \cdot su(x) \quad x := 0, 1 \dots 100$$



Графік розподілу концентрації ШР на відстані x, м

$$\begin{aligned} Cf := & \begin{cases} \text{for } x \in 1, 2 \dots 400 \\ \text{for } l \in 0, 1 \dots l \\ Cf_{x,l} \leftarrow Cmf \cdot su(x) \end{cases} \\ & Cf \end{aligned}$$

Обчислюємо матрицю M , що визначає розподіл концентрації шкідливих речовин $c(x)$ в атмосфері на різних відстанях по всій ширині лінійного джерела і будуємо графік.



c_f

Висновки

1. За алгоритмом розрахунків викиду концентрацій шкідливих речовин у приземному повітрі доквілля було розроблено програмне забезпечення в середовищі MathCAD.
2. Побудоване графічне відображення розподілу концентрацій шкідливих викидів лінійного джерела в приземному повітрі.
3. Побудовано розподіл концентрації шкідливих речовин $c_f = f(x)$ в міському природокористуванні на різних відстанях за всією шириною лінійного джерела за вказаним вектором рози повітря.
4. Розраховані концентрації шкідливих речовин були порівняні з нормованими гранично допустимими концентраціями і були зроблені висновки.
5. В нашому варіанті розрахунків значення концентрацій вище нормованих гранично допустимих концентрацій, тому ми повинні закрити виробництво в будівлі з ліхтарем.
6. Замінити фільтри системи викиду з ліхтаря, або почистити їх.
7. Потім запустити виробництво в цій будівлі з ліхтарем.
8. Таким чином моделювання та прогнозування екологічної безпеки в міському природокористуванні допоможе очистити довкілля від шкідливих речовин та захистить здоров'є людей.

Література

1. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»: Закон від 25.06.1991 № 1264-XII. Ред. від 01.01.2021, підстава – 377-IX. Київ: Верховна Рада України.
2. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля»: Закон від 23.05.2017 № 2059-VIII. Ред. від 20.08.2021, підстава – 1657-IX. Київ: Верховна Рада України.
3. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного керування. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ: Мінекономрозвитку України, 2016. 37 с.

4. ДСТУ ISO 14004:2016. Системи екологічного управління. Загальні настанови щодо запровадження. Київ : Мінекономрозвитку України, 2017. 60 с.
5. Екологічна безпека технологічних процесів у галузі : курс лекцій / уклад.: В. М. Павленко, В. Ю. Тобілко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 145 с.
6. Гидроэнергетика и окружающая среда : монография / под ред.: Ю. А. Ландау, Л. А. Сиренко. Київ : Либра, 2004. 484 с.
7. Ресурсоощадне та чисте виробництво : навч. посіб. Проект у рамках програми «Екологізація економіки в країнах Східного партнерства Європейського Союзу» за підтримки ООН з промислового розвитку (ЮНІДО) та Центру ресурсоефективного та чистого виробництва в Україні. 2017. 87 с.
8. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва : галузь будівельних матеріалів. Проект у рамках програми «Екологізація економіки в країнах Східного партнерства Європейського Союзу» за підтримки ООН з промислового розвитку (ЮНІДО) та Центру ресурсоефективного та чистого виробництва в Україні. 2017. 108 с.
9. Экология города : учебник / под ред. Ф. В. Стольберга. Київ : Либра, 2002. 464 с.
10. Білявський Г. О., Бутченко Л. І. Основи екології : теорія та практикум : навч. посіб. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Лібра, 2004. 368 с.
11. Селіхов Ю. А., Коцаренко В. О. Дистанційний курс з дисципліни «Розрахунок та проектування промислових викидів на ЕОМ» в середовищі програмування MathCAD : для студентів хімічних спеціальностей. Харків : НТУ «ХПІ», 2025.
12. Джигирей В. С. Екологія та охорона навколишнього природного середовища: навч. посіб. Київ : Знання, 2007. 422 с.
13. Коцаренко В. О., Селіхов Ю. А. Обчислення у MathCAD : навч. посіб. Харків : Підручник НТУ «ХПІ», 2011. 192 с.

Bibliography (transliterated)

1. Zakon Ukrainy «Pro okhoronu navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha» : Zakon vid 25.06.1991 № 1264-KhII. – Red. vid 01.01.2021, pidstava – 377-IX. Kyiv : VRU.
2. Zakon Ukrainy «Pro otsinku vplyvu na dovkillia» : Zakon vid 23.05.2017 № 2059-VIII. Red. vid 20.08.2021, pidstava 1657-IKh. Kyiv : VRU.
3. DSTU ISO 14001:2015. Systemy ekolohichnoho keruvannia. Vymohy ta nastanovy shchodo zastosuvannia. Kyiv, 2016. 37 p.
4. DSTU ISO 14004:2016. Systemy ekolohichnoho upravlinnia. Zahalni nastanovy shchodo zaprovadzhuвання. Kyiv, 2017. 60 p.
5. Ekolohichna bezpeka tekhnolohichnykh protsesiv u haluzi : kurs lektsii / uklad.: V. M. Pavlenko, V. Yu. Tobilko. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2019. 145 p.
6. Hydroenerhetyka y okruzhaiushchaia sreda : monohrafiya / pod red. Yu. A. Landau, L. A. Syrenko. Kyiv : Lybra, 2004. 484 p.
7. Resursooshchadne ta chyste vyrobnytstvo : navch. posib. Proiekt u ramkakh prohramy «Ekolohizatsiia ekonomiky v krainakh Skhidnoho partnerstva Yevropeiskoho Soiuzu» za pidtrymky OON z promyslovoho rozvytku (IuNIDO) ta Tsentru resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva v Ukraini. 2017. 87 p.
8. Dovidnyk z resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva : haluz budivelnykh materialiv. Proiekt u ramkakh prohramy «Ekolohizatsiia ekonomiky v krainakh Skhidnoho partnerstva Yevropeiskoho Soiuzu» za pidtrymky OON z promyslovoho rozvytku (IuNIDO) ta Tsentru resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva v Ukraini. 2017. 108 p.

9. Ekolohyia horoda : uchebnyk / pod red. F. V. Stolberha. Kyiv : Lybra, 2002. 464 p.
10. Biliavskiy H. O., Butchenko L. I. Osnovy ekolohii : teoriia ta praktykum : navch. posib. 2-he vyd., pererob. i dop. Kyiv : Libra, 2004. 368 p.
11. Dystantsiyni kurs z dystsypliny «Rozrakhunok ta proektuvannia promyslovykh vykydiv na EOM» v seredovyshchi prohramuvannia MathCAD : dlia studentiv khimichnykh spetsialnostei. Kharkiv : NTU «KhPI», 2025.
12. Dzhyhyrei V. S. Ekolohiia ta okhrona navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha: navch. posib. Kyiv : Znannia, 2007. 422 p.
13. Kotsarenko V. O., Selikhov Yu. A. Obchyslennia u MathCAD : navch. posib. Kharkiv : Pidruchnyk NTU «KhPI», 2011. 192 p.

УДК 614.72:628.51.001.2

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, професор,
Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор, К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор,
А. М. Миронов, канд. техн. наук, доцент, М. В. Ільченко, канд. техн. наук, доцент,
Г. В. Пономаренко, канд. техн. наук, доцент

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ У МІСЬКОМУ ПРИРОДОКОРИСТУВАННІ

Одним із напрямків реалізації моделювання та прогнозування екологічної безпеки навколишнього природного середовища у міському природокористуванні, – це зробити розрахунок викидів шкідливих речовин в навколишнє природне середовище із джерел викиду різної конфігурації, розташованих на підприємствах міського природокористування. Викиди шкідливих речовин від підприємств осаджаються із повітряного басейну на будинки, рослини та прилеглі ґрунти, розташовані навколо промислового підприємства у міському природокористуванні. Розрахунки концентрацій шкідливих речовин в приземному повітрі порівнюють з нормованими гранично допустимими концентраціями та роблять висновки. В нашому варіанті розрахунків були зроблені наступні висновки: За алгоритмом розрахунків викиду концентрацій шкідливих речовин в приземному повітрі довкілля було розроблено програмне забезпечення в середовищі MathCAD; Побудоване графічне відображення розподілу концентрацій шкідливих викидів лінійного джерела в приземному повітрі; Побудовано розподіл концентрацій шкідливих речовин $c_f = f(x)$ в міському природокористуванні на різних відстанях за всією шириною лінійного джерела за вказаним вектором рози вітру; Розраховані концентрації шкідливих речовин були порівняні з нормованими гранично допустимими концентраціями і були зроблені висновки; В нашому варіанті розрахунків значення концентрацій вище нормованих гранично допустимих концентрацій, тому ми повинні закрити виробництво в будівлі з ліхтарем; Замінити фільтри системи викиду з ліхтаря, або почистити їх; Потім запустити виробництво в цій будівлі з ліхтарем; Таким чином моделювання та прогнозування екологічної безпеки в міському природокористуванні допоможе очистити довкілля від шкідливих речовин та захистить здоров'я людей.

Підприємства, установи, організації, діяльність яких пов'язана з негативним шкідливим впливом на атмосферне повітря, повинні вживати заходів щодо зменшення обсягів викидів забруднюючих речовин і зниження шкідливого впливу фізичних і біологічних факторів, здійснювати контроль за обсягом та складом забруднюючих речовин, забезпечувати безперебійну та ефективну роботу очисного обладнання.

Ключові слова: моделювання, прогнозування, екологічна безпека, розрахункове прогнозування, забруднення повітря, промислові підприємства, міське природокористування, навколишнє природне середовище, здоров'я людини, викиди, шкідливі речовини, нормовані величини, гранично допустимі концентрації (ГДК), технологічні та вентиляційні викиди, забруднення, роза вітрів, природні ресурси, енергія природи, механізми самоочищення.

L. L. Tovazhnyanskyu, Yu. A. Selikhov, K. O. Gorbunov, A. N. Myronov, M. V. Ilchenko,
G. V. Ponomarenko

MODELING AND FORECASTING ENVIRONMENTAL SAFETY IN URBAN NATURE MANAGEMENT

One of the areas of implementation of modeling and forecasting of environmental safety of the natural environment in urban nature management is to calculate emissions of harmful substances into the natural environment from emission sources of various configurations. Emissions of harmful substances from enterprises are deposited from the air onto houses, plants and nearby soils located around the industrial enterprise in urban nature management. Calculations of concentrations of harmful substances in ground-level air are compared with standardized maximum permissible concentrations and conclusions are drawn. In our version of calculations, the following conclusions were made: According to the algorithm for calculating the emission of concentrations of harmful substances in the ground air of the environment, software was developed in the MathCAD environment; A graphical representation of the distribution of concentrations of harmful emissions from a linear source in ground-level air has been constructed; The distribution of concentrations of harmful substances has been constructed $c_f = f(x)$ in urban nature management at different distances across the entire width of the linear source along the specified wind rose vector; The calculated concentrations of harmful substances were compared with the standardized maximum permissible concentrations and conclusions were drawn; In our case, the calculated concentration values are higher than the standard maximum permissible concentrations, so we must close the production in the building with the lantern; Replace the filters of the exhaust system from the lantern, or clean them; Then start production in this building with the lantern; Thus, modeling and forecasting environmental safety in urban nature management will help cleanse the environment of harmful substances and protect human health.

Enterprises, institutions, and organizations whose activities are associated with a negative harmful effect on the atmospheric air must take measures to reduce the volume of emissions of pollutants and reduce the harmful effects of physical and biological factors, monitor the volume and composition of pollutants, and ensure uninterrupted and efficient operation.

Keywords: modeling, forecasting, environmental safety, computational forecasting, air pollution, industrial enterprises, urban nature management, environment, human health, emissions of harmful substances, standardized values, maximum permissible concentrations (MPC), technological, ventilation emissions, wind rose, natural resources, energy of nature, self-purification mechanisms.

О. Б. Аніпко, д. техн. н., професор, В. Ю. Тюріна, канд. техн. наук,
О. М. Панкул, старший викладач

МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРОКІВ ПОЧАТКУ ПРОВЕДЕННЯ ПРОФІЛАКТИЧНИХ РОБІТ ПРИ ЗМІНІ ІНТЕНСИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

Ключові слова: повітряні судна, технічний стан, експлуатація, профілактичні роботи, прогнозування, надійність, економічні показники, життєвий цикл, залишкова вартість, вартість експлуатації, амортизація.

Відомо, що фактичний технічний стан об'єкта, який перебуває на певному етапі експлуатації в межах його життєвого циклу, зазвичай відрізняється від прогнозованого на кожен конкретний момент часу. Це зумовлено тим, що для будь-якої технічної системи ще на етапі проєктування задається розрахунковий режим експлуатації, який у подальшому уточнюється за результатами випробувань. Унаслідок цього формується система показників, зокрема ресурсних критеріїв та параметрів технічного стану, за якими здійснюється оцінювання фактичного стану об'єкта. На підставі отриманих даних плануються організаційно-технічні заходи, спрямовані на забезпечення заданого рівня надійності, експлуатаційної придатності та прогнозованого залишкового ресурсу.

У процесі експлуатації ресурси об'єкта поступово вичерпуються, а його залишкова вартість безперервно зменшується. На певному етапі життєвого циклу це призводить до виникнення проблеми невідповідності між фактичним технічним станом системи та очікуваними параметрами на конкретний момент часу.

Ця проблема набула особливої актуальності в умовах загальної тенденції до скорочення експлуатаційних витрат на виробництво машинобудування загалом та транспортні засоби зокрема [1–3]. У зв'язку з цим виникла потреба у наявності чітких критеріїв, які дозволяють визначити фактичний технічний стан об'єкта та приймати обґрунтовані рішення щодо його відновлення, ремонту, заміни або подальшої експлуатації.

Слід особливо підкреслити, що під терміном «елемент» у цьому контексті може розумітися як окрема деталь, так і вузол, система або функціональний модуль технічного засобу [4–5].

Дослідження у цьому напрямі проводились і продовжують проводитися для більшості видів транспортних засобів та їх окремих складових. Зокрема, це стосується автомобільного, залізничного, водного та повітряного транспорту.

Аналіз наявних публікацій [6–7], а також удосконалених даних щодо ресурсних показників для різних транспортних об'єктів, засвідчує, що, попри досягнуті успіхи, на сьогодні не розроблено єдиного методичного підходу до вирішення цієї проблеми. Крім того, спостерігається розрив і відсутність узгодженості між оцінками технічного стану об'єкта та економічними показниками, зокрема залишковою вартістю, витратами на ремонт і загальними експлуатаційними витратами.

Відомо з теорії та практики концептуального проєктування виробів машинобудування, що під час техніко-економічного обґрунтування доцільності розробки пріори-

тет надається саме економічному аналізу. Це зумовлено тим, що саме економічне обґрунтування визначає принципову можливість забезпечення споживача доступними за вартістю виробами. У цьому контексті практично важливим є завдання розроблення єдиного (універсального) підходу до визначення технічного стану об'єкта, що перебуває в експлуатації, у фіксований момент часу, а також відповідних економічних показників.

Розв'язанню цього актуального завдання й присвячено дану статтю.

Усі спроектовані технічні об'єкти за своєю суттю є ненадійними, оскільки їхні характеристики змінюються з часом та інтенсивністю використання. Як наслідок, такі об'єкти в кінцевому підсумку вийдуть з ладу, якщо їхнє обслуговування не буде своєчасним та якісним. У контексті забезпечення справності, особливо в умовах інтенсивної експлуатації, ключовим завданням є не просто проведення профілактичних робіт, а їхнє виконання у раціональні терміни. Зміна інтенсивності використання повітряних суден (ПС) безпосередньо впливає на швидкість їхньої деградації та вичерпання ресурсу. Це вимагає розробки та впровадження ефективних методів прогнозування, які дозволять оптимізувати графіки технічного обслуговування, мінімізувати простой та, зрештою, підвищити надійність і доступність авіаційної техніки.

Розглянемо модель, в якій деяка технічна система знаходиться на етапі експлуатації життєвого циклу. Її технічний стан характеризується показником Π , котрий нормований на ступним чином:

$$\Pi = \frac{\Pi(t)}{\Pi(\max)},$$

де $\Pi(t)$ – значення показника в момент часу t , а $\Pi_{\max}$ – найбільше можливе значення показника. Зрозуміло, що діапазон значень Π знаходиться в інтервалі $0 < \Pi \leq 1$. Існує певне значення t , після якого функціонування технічної системи має бути припинено з міркувань недоцільності чи небезпеки.

Показник, що визначає цей момент, назовемо критичним ($\Pi_{кр}$) рис. 1.

Приймаємо також, що у випадку, коли система експлуатується в умовах, передбачених під час її створення, то в моменти часу $\bar{t}$, коли $0 \leq \bar{t} \leq \bar{t}_{кр}$, показник $\Pi(t)$ набуває очікуваних значень. Сукупність цих значень визначає функцію $\Pi = f(\bar{t})$, що відповідає розрахунковому режиму експлуатації (рис. 1).

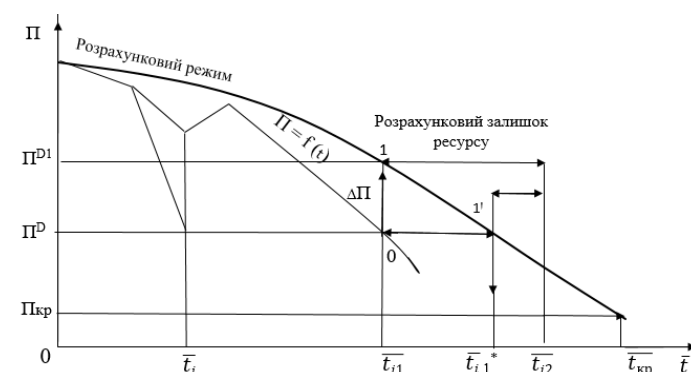


Рисунок 1 – Розрахунковий режим експлуатації

Усе різноманіття реальних процесів, що відбуваються на етапі експлуатації, можна розділити на дві групи: перша – ті, що знижують значення показника Π (наприклад, використання за призначенням), і друга група ті, що підвищують значення цього показника (наприклад, організаційно-технічні заходи).

Слід особливо підкреслити, що розрахунковий режим експлуатації в певному сенсі є ідеальним, оскільки відображає максимально можливі значення показників Π у кожен момент часу. Фактичні значення показника Π на практиці завжди нижчі за очікувані, проте знаходяться в межах допустимих відхилень. Це пов'язано з тим, що практично всі основні технічні відхилення взагалі, а транспортних засобів зокрема, є непередбачуваними [8]. Це означає, що вплив зовнішніх та внутрішніх факторів, а також їхніх властивостей, з часом змінюються (непостійно), але залишаються в допустимому для використання за призначенням діапазоні. Це обґрунтовується конструктивно, технологічно та виконанням вимог з експлуатації.

Під впливом різноманітних зовнішніх факторів (аналіз впливу яких виходить за рамки цієї статті і є окремим завданням) фактичне значення показника Π може відрізнитися від розрахункового режиму на величину, що перевищує допустиме відхилення:

$$|\Pi - \Pi^*| > \Delta \Pi^{\text{доп}}.$$

У цьому випадку виникає задача оцінки фактичного показника Π , що відповідає фактичному стану технічної системи.

Будемо вважати, що в момент часу t_{i1} певним чином встановлено значення показника Π^D , причому таке, що його значення перевищує допустиме відхилення від значення, яке відповідає розрахунковому режиму експлуатації (т.0, рис. 1). Тоді значення Π^{D1} відповідає очікуваному значенню, що відповідає розрахунковому режиму.

При цьому залишковий ресурс, що відповідає розрахунковому режиму експлуатації, буде визначатися різницею $(\overline{t_{i2}} - \overline{t_{i1}})$. Однак таким чином визначений залишковий ресурс не відповідає фактичному стану технічної системи, який визначається значенням Π^D у момент часу $\overline{t_{i1}}$. Для визначення дійсного залишкового ресурсу з т. 0 (рис. 1) потрібно провести горизонталь до перетину з лінією, що відповідає розрахунковому режиму (т.1'). Ця точка, у свою чергу, визначає ефективний час $\overline{t_{i1}^*}$ (рис. 1), яка і дозволяє визначити дійсний залишковий ресурс, що відповідає фактичному стану технічної системи:

$$\overline{t_{i2}} - \overline{t_{i1}^*}, \text{ як видно, } (\overline{t_{i2}} - \overline{t_{i1}}) > (\overline{t_{i2}} - \overline{t_{i1}^*}).$$

Тому визначення фактичного залишкового ресурсу є важливим, оскільки при будь-якій експлуатації технічних систем загалом, і транспортних засобів зокрема, період використання за призначенням не повинен перевищувати залишкового ресурсу.

У зв'язку з цим виникає інше практично важливе завдання щодо визначення раціональних термінів початку та проведення профілактичних робіт для підтримки показників, що характеризують технічний стан системи в допустимих межах.

Будемо вважати, що для технічної системи відома функція $\Pi = f(\bar{t})$ для розрахункового режиму експлуатації та функція $\Pi^* = \varphi(\bar{t})$, що відображає фактичне значення показників для даних умов експлуатації (рис. 2).

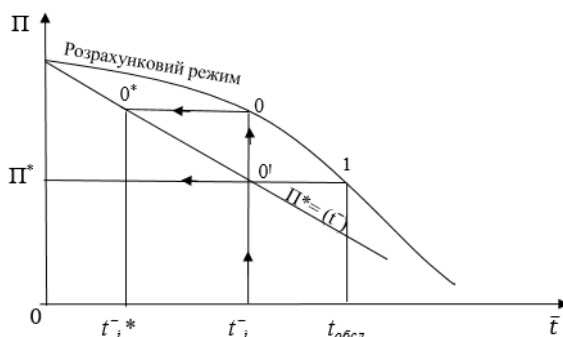


Рисунок 2 – Прогнозування часу початку профілактичних робіт

Ще раз підкреслимо, що обчислення закономірності $\Pi^* = (\bar{t})$ є окремим завданням. Тоді, наприклад, точка 1 (рис. 2) визначить ефективний час $t_{обсл}$, що відповідає технічному стану в розрахунковому режимі експлуатації. При цьому раціональний час початку профілактичних робіт (t_{i1}^*) визначатиметься за допомогою т. 0* (рис. 2), яка визначає фактичний стан технічної системи, що відповідає умовам експлуатації та описується функцією $\Pi^* = (\bar{t})$.

Таким чином, розроблений підхід дозволяє прогнозувати час початку профілактичних робіт не за часом експлуатації, а відповідно до технічного стану системи, зумовленого умовами експлуатації. Це, своєю чергою, забезпечує, щонайменше, не зниження контрольованого показника нижче допустимого значення.

Визначений таким чином ефективний строк експлуатації, тобто той, який визначено на основі технічного стану об'єкта та залишковий ресурс, дозволяють оцінити і економічні показники рис. 3.

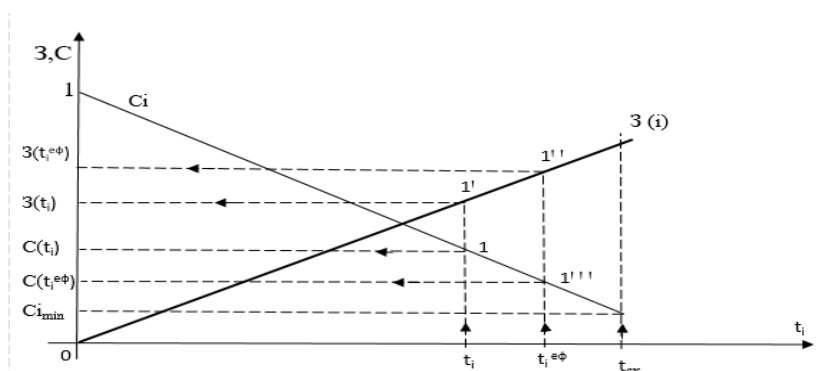


Рисунок 3 – Графік залежності вартості і відмов

Для визначення витрат на експлуатацію та залишкової вартості до фактичного стану об'єкта за значенням ефективного часу експлуатації.

Як видно з рисунку 3 за показником ефективного строку експлуатації визначаємо залишкову вартість об'єкта, а також очікуване значення експлуатаційних витрат.

Доцільно порівняти це значення із фактичними витратами на експлуатацію. Для об'єктів авіаційного транспорту це вартість однієї години льотної експлуатації. В тому випадку, якщо фактичні витрати суттєво перевищують спрогнозовані значення, то необхідний аналіз доцільності подальшої експлуатації.

Слід зауважити, що вид функції залишкової вартості від часу експлуатації визначається методом розрахунку амортизації (рівномірний, зменшення залишку тощо). Однак, незалежно від цього, це лінійна функція або крива другого порядку, підхід залишається постійним. На рис. 3 представлено лінійну функцію, для наочності загального підходу, який залишається незмінним і за іншої залежності залишкової вартості від часу експлуатації.

Висновки

Таким чином, розроблено узагальнений підхід методу прогнозування раціональних строків початку проведення профілактичних робіт при зміні інтенсивності експлуатації повітряних суден. Важливою перевагою розробленого методу є те, що він дозволяє визначати як технічний стан, так і відповідні економічні показники під час експлуатації об'єкта техніки, що вигідно відрізняє його від відомих підходів, які не передбачають таку взаємозалежність.

Слід особливо підкреслити важливість визначення залишкового ресурсу, що відповідає фактичному стану технічної системи, особливо для об'єктів транспорту, які характеризуються підвищеною небезпекою.

Література

1. Аніпко О. Б., Калкаманов С. А., Приймак А. В. Формули пріоритетів і хінсайд-аналіз при варіантних проробках на етапі концептуального проєктування транспортного літака. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. № 2. С. 11–19.
2. Anipko O., Loginov V. An “Integration index” for determining the degree of subsystem integration in passenger and transport aircraft designs. *Transactions on Aerospace Research*. 2024. Vol. 277, No. 4. P. 27–44. DOI: 10.2478/tar-2024-0021.
3. Аніпко О. Б., Білий М. Ф. Дистрибутивний підхід до аналізу готовності авіаційного парку з формалізацією прихованих відмов. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. № 2. С. 79–83. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.2.09.
4. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1994. 96 с.
5. ДСТУ 2498-94. Основні норми взаємозамінності. Допуски форми та розташування поверхонь. Терміни та визначення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1994. 59 с.
6. Аніпко О. Б., Приймак А. В. Комплексування показників досконалості транспортних систем. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. № 4. С. 43–50.
7. Аніпко О. Б., Приймак А. В., Миргород Ю. І. Перелік показників властивостей і база даних ТТХ транспортного літального апарата як складної технічної системи. *Інтегровані технології та енергозбереження*. Харків : НТУ «ХПІ», 2013. № 1. С. 123–125.
8. Труханов В. М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов. Москва : Машиностроение, 2003. 320 с.

9. Максимов Н. А., Боборыкин С. А., Виноградов А. И., Кузьмин В. П. Инженерно-авиационная служба и эксплуатация летательных аппаратов. Киев : КВИАВУ ВВС, 1969. 467 с.
10. Мітрахович М. М. Складні технічні системи. Системне математичне забезпечення проектних рішень. Київ : Нічлава, 1998. 184 с.
11. Bar-Yam Y. General Features of Complex Systems. *Encyclopedia of Life Support Systems*. Oxford : EOLSS UNESCO Publishers, 2002. Retrieved 16 September 2014.
12. Виклюк Я. І., Камінський Р. М., Пасічник В. В. Моделювання складних систем : навч. посіб. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2024. 248 с.
13. Нові інформаційні технології, моделювання та автоматизація : кол. монографія / за ред. О. Д. Мороза. Київ : Техніка, 2023. 320 с.

Bibliography (transliterated)

1. Anipko O. B., Kalkamanov S. A., Pryimak A. V. Formuly priorytetiv i khin-said-analiz pry variantnykh prorobkakh na etapi kontseptualnoho proiektuvannia transportnoho litaka. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2020. № 2. P. 11–19.
2. Anipko O., Loginov V. An “Integration index” for determining the degree of subsystem integration in passenger and transport aircraft designs. *Transactions on Aerospace Research*. 2024. Vol. 277, No. 4. P. 27–44. DOI: 10.2478/tar-2024-0021.
3. Anipko O. B., Bilyi M. F. Dystrybutyvnyi pidkhid do analizu hotovnosti aviatsiinoho parku z formalizatsiieiu prykhovanykh vidmov. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2020. № 2. P. 79–83. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.2.09.
4. DSTU 2860-94. Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 1994. 96 p.
5. DSTU 2498-94. Osnovni normy vzaiemozaminnosti. Dopusky formy ta roztashuvannia poverkhon. Terminy ta vyznachennia. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 1994. 59 p.
6. Anipko O. B., Pryimak A. V. Kompleksuvannia pokaznykiv doskonalosti transportnykh system. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2014. No. 4. P. 43–50.
7. Anipko O. B., Pryimak A. V., Myrhorod Yu. I. Perelik pokaznykiv vlastyvostei i baza danykh TTKh transportnoho litalnoho aparata yak skladnoi tekhnichnoi systemy. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. Kharkiv : NTU «KhPI», 2013. No. 1. P. 123–125.
8. Trukhanov V. M. Nadezhnost tekhnicheskikh system tipa podvyzhnykh ustanovok na etape proektyrovaniia y uspytaniia opytnykh obraztsov. Moskva : Mashynostroenye, 2003. 320 p.
9. Maksymov N. A., Boborykyn S. A., Vynohradov A. Y., Kuzmyn V. P. Ynzhenerno-avyatsyonnaia sluzhba y ekspluatatsiia letatelnykh apparatov. Kyiv : KVIYAVU VVS, 1969. 467 p.
10. Mitrahovych M. M. Skladni tekhnichni systemy. Systemne matematychno zabezpechennia proektnykh rishen. Kyiv : Nichlava, 1998. 184 p.
11. Bar-Yam Y. General Features of Complex Systems. *Encyclopedia of Life Support Systems*. Oxford : EOLSS UNESCO Publishers, 2002. Retrieved 16 September 2014.
12. Vykliuk Ya. I., Kaminskyi R. M., Pasichnyk V. V. Modeliuvannia skladnykh system : navch. posib. Lviv : NU «Lvivska politekhnika», 2024. 248 p.
13. Novi informatsiini tekhnolohii, modeliuvannia ta avtomatyzatsiia : kol. monohrafiia za red. O. D. Moroza. Kyiv : Tekhnika, 2023. 320 p.

УДК 629.735:62-192(043.3)

О. Б. Аніпко, д. техн. н., професор, В. Ю. Тюріна, канд. техн. наук,
О. М. Панкул, старший викладач

МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРОКІВ ПОЧАТКУ ПРОВЕДЕННЯ ПРОФІЛАКТИЧНИХ РОБІТ ПРИ ЗМІНІ ІНТЕНСИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

У статті розглянуто проблему зміни фактичного технічного стану та вичерпання ресурсу складних технічних систем, зокрема повітряних суден (ПС), що перебувають в активній експлуатації. Встановлено, що інтенсивність використання ПС постійно змінюється, що призводить до невідповідності між розрахунковими та фактичними даними щодо їхнього технічного стану та залишкового ресурсу. Це, у свою чергу, викликає непередбачене зростання експлуатаційних витрат. Традиційні методи обслуговування, які базуються на жорстко встановлених строках або розрахунковому терміні експлуатації, виявляються неефективними в умовах інтенсивної експлуатації. Вони часто призводять до передчасної заміни ще придатних компонентів або, навпаки, до виникнення критичних відмов, що значно підвищує ризики. Підґрунтям дослідження є встановлений факт невідповідності між прогнозованими та фактичними показниками технічного стану авіаційної техніки протягом усього життєвого циклу. Ця розбіжність зумовлює нагальну необхідність розробки адаптивного підходу до планування технічного обслуговування. Невідповідність між прогнозами та реальністю, у свою чергу, спричиняє неконтрольоване зростання експлуатаційних витрат та зниження залишкової вартості об'єкта.

Проаналізовано вплив зміни інтенсивності використання літальних апаратів на швидкість деградації конструкцій та вичерпання їх ресурсу. Запропоновано методику, в якій технічний стан описується нормованим показником, що інтегрує як розрахунковий режим експлуатації, визначений виробником, так і фактичні умови використання, що спостерігаються в реальному часі. Визначено критерій критичного стану, при досягненні якого подальша експлуатація стає недоцільною або небезпечною з огляду на ризики відмови.

Окремо обґрунтовано метод визначення фактичного залишкового ресурсу, що базується на порівнянні розрахункового та фактичного значень технічного стану з урахуванням допустимих відхилень, визначених технічними регламентами. Цей інноваційний підхід передбачає прогнозування моменту початку профілактичних робіт не за календарним часом або напрацюванням, як це зазвичай робиться, а відповідно до реального технічного стану системи, зумовленого інтенсивними умовами експлуатації.

Запропоновано комплексний алгоритм, який поєднує технічну оцінку з ключовими економічними показниками, зокрема динамікою зміни залишкової вартості та очікуваними експлуатаційними витратами. Такий підхід забезпечує комплексність та обґрунтованість прийняття рішень щодо доцільності подальшої експлуатації або проведення ремонту.

Показано, що застосування такого підходу дозволяє мінімізувати ризик передчасного або запізненого обслуговування, підвищити ефективність використання авіаційної техніки та істотно знизити сумарні витрати протягом її життєвого циклу. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем планування технічного обслуговування у цивільній та військовій авіації, а також адаптовані для інших видів складних технічних систем.

Ключові слова: повітряні судна, технічний стан, експлуатація, профілактичні роботи, прогнозування, надійність, економічні показники, життєвий цикл, залишкова вартість, вартість експлуатації, амортизація.

O. B. Anipko, V. Yu. Tiurina, O. M. Pankul

**METHODS FOR FORECASTING RATIONAL STARTING TIMES
FOR PREVENTIVE MAINTENANCE DURING CHANGES
IN AIRCRAFT OPERATIONAL INTENSITY**

The article addresses the problem of changes in the actual technical condition and resource depletion of complex technical systems, particularly aircraft (AC), which are in active operation. It has been established that the intensity of AC use constantly changes, leading to a discrepancy between calculated and actual data regarding their technical condition and residual resource. This, in turn, causes unforeseen increases in operational costs. Traditional maintenance methods, based on rigidly set deadlines or the calculated service life, prove ineffective under conditions of intensive operation. They often lead to premature replacement of still-serviceable components or, conversely, to the occurrence of critical failures, which significantly increases risks. The basis of the study is the established fact of a discrepancy between the predicted and actual indicators of the technical condition of aviation equipment throughout its entire life cycle. This discrepancy necessitates the urgent development of an adaptive approach to maintenance planning. The inconsistency between forecasts and reality, in turn, causes an uncontrolled increase in operational costs and a decrease in the object's residual value.

The influence of changes in the intensity of aircraft use on the speed of structural degradation and resource depletion has been analyzed. A methodology is proposed in which the technical condition is described by a normalized indicator that integrates both the calculated operating mode, determined by the manufacturer, and the actual conditions of use observed in real-time. A criterion for a critical state is defined, upon reaching which further operation becomes impractical or dangerous due to the risk of failure.

A separate method is substantiated for determining the actual residual resource, which is based on a comparison of the calculated and actual values of the technical condition, taking into account permissible deviations defined by technical regulations. This innovative approach involves forecasting the start of preventive maintenance work not by calendar time or operating hours, as is usually done, but according to the actual technical condition of the system, determined by intensive operating conditions.

A comprehensive algorithm is proposed that combines the technical assessment with key economic indicators, including the dynamics of residual value changes and expected operational costs. This approach ensures the comprehensiveness and validity of decisions regarding the expediency of further operation or repair.

It is shown that the application of such an approach allows for minimizing the risk of premature or delayed maintenance, increasing the efficiency of aviation equipment use, and significantly reducing total costs throughout its life cycle. The results obtained can be used to improve maintenance planning systems in civil and military aviation, as well as adapted for other types of complex technical systems that require adaptive management.

Keywords: aircraft, technical condition, operation, preventive maintenance, forecasting, reliability, economic indicators, life cycle, residual value, operating cost, depreciation.

О. М. Близнюк¹, д-р техн. наук, професор, Б. В. Путятін¹, аспірант, С. В. Станкевич², канд. с.-г. наук, доцент, Я. О. Свіщова², канд. хім. наук, доцент, Н. Ю. Масалітіна¹, канд. техн. наук, доцент, А. П. Белінська¹, канд. техн. наук, доцент

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ЕМУЛЬСІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БІОПОЛІМЕРІВ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ОКИСНОМУ ПСУВАННЮ БЕТА-КАРОТИНУ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

²Державний біотехнологічний університет, Харків

Ключові слова: емульсійна система, конопляна олія, біополімери, хітозан, ксантанова камідь, β-каротин, окисна стабільність.

Вступ

Сучасні емульсійні системи на основі біополімерів відіграють важливу роль у розробці стабільних косметичних, фармацевтичних та харчових продуктів. Особливу увагу привертають системи, що містять β-каротин – потужний антиоксидант і провітамін А, який підвищує біологічну цінність продуктів, але швидко деградує під впливом окиснення [1]. Основною проблемою таких систем є низька стійкість ліпідної фази, особливо при використанні поліненасичених жирних кислот (ПНЖК), що містяться в цінних оліях, таких як конопляна. Окиснення призводить не лише до втрати користі β-каротину, а й до появи небажаних продуктів розпаду, що погіршують якість продукту [2, 3].

Для запобігання окисному псуванню перспективним є застосування біополімерів (наприклад, хітозану та ксантанової камеді), які стабілізують емульсію та уповільнюють деградацію активних компонентів [4]. Однак їхній вплив на стабільність β-каротину потребує подальшого вивчення.

Дослідження існуючих рішень проблеми

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить про активний пошук ефективних методів стабілізації емульсійних систем, зокрема для запобігання окисному псуванню біологічно активних компонентів. У роботі [5] було вивчено ефективність природних екстрактів (зубрівки та кореневища лепехи) для стабілізації ліпідної фази, проте виявлено їх недостатню антиоксидантну активність у досліджуваних концентраціях та появу сторонніх присмаків при підвищенні дозування.

Дослідження [6, 7] демонструють потенціал рослинних екстрактів (м'яти, меліси, чебрецю, шкірки гранату) як антиоксидантів для олійних систем. Встановлено, що найбільш ефективними компонентами цих екстрактів є терпени та терпеноїди, зокрема карнозол, розмаринова та кавова кислоти. Однак залишається невирішеним питання їхньої стабільності за підвищених температур та впливу на органолептичні властивості продуктів.

Важливим напрямком є вивчення синергізму між різними типами антиоксидантів емульсійних систем. Роботи [8, 9] підтверджують, що комбінації токоферолів, β-каротину та фенолкарбонових кислот мають кумулятивний ефект у запобіганні окисненню. Особливу увагу привертають дослідження стабільності конопляної олії [10], яка

містить до 86 % поліненасичених жирних кислот. Встановлено, що оптимальне співвідношення конопляної та кукурудзяної олій (6:4) дозволяє збалансувати вміст α -ліноленової кислоти (10,6 %) та підвищити окисну стабільність.

Сучасні дослідження [11, 12] вказують на складність взаємодії компонентів емульсійних систем. Виявлено, що солі (NaCl, KCl) можуть прискорювати окиснення ліпідної фази, тоді як β -каротин демонструє потенціал для підвищення стабільності систем за рахунок взаємодії з білковими компонентами.

Таким чином, незважаючи на значний прогрес у дослідженнях, залишаються невирішеними ключові питання щодо оптимізації складу емульсійних систем на основі біополімерів для ефективного захисту β -каротину від окиснення. Особливої уваги потребує вивчення взаємодії біополімерів (хітозану, ксантанової камеді) з антиоксидантами у складі емульсій на основі конопляної олії, що дозволить розробити стабільні продукти з підвищеною біологічною цінністю.

Мета та основні задачі дослідження

Метою дослідження є оптимізація складу емульсійних систем на основі біополімерів (хітозану та ксантанової камеді) для захисту β -каротину від окисного псування у складі ліпідної фази на основі конопляної олії. Отримані результати дозволять розробити стабільні емульсійні композиції з підвищеною біологічною цінністю та продовженим терміном зберігання.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі задачі:

- дослідити вплив хітозану та ксантанової камеді на окисну стабільність емульсійної системи на основі конопляної олії за умов прискореного окиснення;
- оцінити ефективність β -каротину як антиоксиданта для гальмування окисного псування ліпідної фази в оптимізованій біополімерній емульсійній системі;
- визначити стійкість розробленої емульсійної системи з β -каротином до окисного псування при різних умовах зберігання.

Матеріали та методи досліджень

Під час досліджень використано такі матеріали:

- олія конопляна рафінована (виробництво Україна), згідно з CAS 89958-21-4;
- олія кукурудзяна рафінована (виробництво Україна), згідно з CAS 8001-30-7;
- олійний розчин β -каротину 0,2 % (виробництво Китай), згідно з CAS 7235-40-7;
- хітозан (виробництво Китай), згідно з CAS 9012-76-4;
- ксантанова камідь (виробництво Китай), згідно з CAS 11138-66-2;
- дистильована вода (виробництво Україна), згідно з CAS 7732-18-5.

Пероксидне число ліпідної складової визначено титриметричним методом згідно ДСТУ ISO 3960 відповідно. Ліпідну фракцію емульсійної системи вилучено екстракційним методом. Період індукції прискореного окиснення ліпідної складової емульсійних систем проведено прискореним методом «активного кисню» згідно з ДСТУ ISO 6886.

Модельні зразки емульсійних систем отримано наступним чином. Підготована ліпідна сировина (олії, олійний розчин β -каротину) змішується для створення купажу, застосовується нагрівання до 35 °C. В підготовленій воді розчиняють хітозан і ксантанову камідь. Потім в водний розчин поступово при ретельному перемішуванні додається ліпідна сировина, емульсійна система піддається гомогенізації (швидкість не менш ніж 1000 об./хв.) протягом 5 хвилин. Фізико-хімічні показники емульсійних систем визначені згідно ДСТУ 4487.

Експерименти проведено в трикратному повторенні. Статистичні моделі залежностей визначено шляхом апроксимації результатів експериментів за допомогою побудови лінії тренду. Для обробки даних щодо залежності періоду індукції окиснення ліпідної складової емульсійної системи від часу та температури зберігання застосовано математичні методи з використанням програмного пакету *Stat Soft Statistica v 6.0* (США).

Результати дослідження

Визначено вплив співвідношення ефективного вмісту біополімерів – стабілізаторів емульсійної системи (хітозану та ксантанової каміді) на період індукції прискореного окиснення її ліпідної складової. Діаграма отриманої залежності наведена на рис. 1.

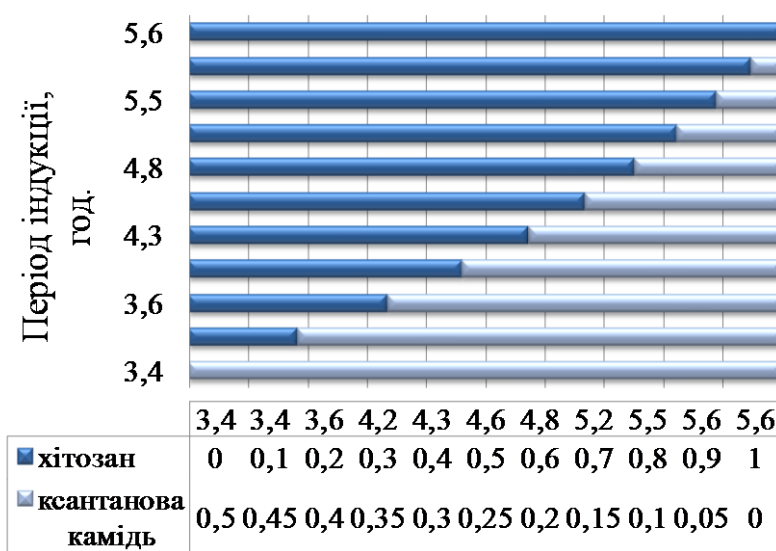


Рисунок 1 – Залежність періоду індукції прискореного окиснення модельних зразків емульсійної системи від вмісту біополімерів – стабілізаторів

Вміст хітозану в емульсійній системі варіювали в інтервалі 0,0...1,0 % з кроком 0,1 %. Вміст ксантанової каміді – в інтервалі 0,0...0,5 % з кроком 0,05 %. Необхідно зазначити, що стійкість емульсії в зразках становила близько 100,0 %. Отримані значення періоду індукції прискореного окиснення олійної композиції знаходилися в межах 3,4...5,6 год.

Досліджено вплив олійного розчину β -каротину 0,2 % на період індукції прискореного окиснення модельного зразку емульсійної системи складу, (стабілізатори емульсії: хітозан – 0,8 %, ксантанова камідь – 0,1 %). Як контрольний зразок використано подібний модельний зразок емульсійної системи, де як стабілізатор емульсії використано ксантанову камідь – 0,5 %. Графічні відображення отриманих залежностей наведено на рис. 2.

Необхідно зазначити, що наведені залежності дозволяють адекватно розраховувати величину періоду індукції прискореного окиснення емульсійної системи, що є прямо пропорційним терміну зберігання, в інтервалах вмісту 0,2 %-го олійного розчину β -каротину 0,0...7,5 %.

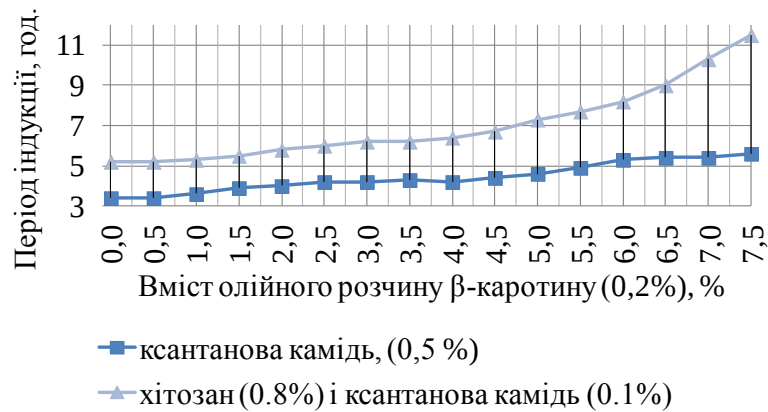


Рисунок 2 – Залежність періодів індукції прискореного окиснення модельних зразків емульсійної системи від вмісту β-каротину

Для визначення впливу на терміни зберігання емульсійної системи, стабілізованої β-каротином, таких параметрів як температура зберігання і час зберігання, досліджено вміст первинних продуктів окиснення, що утворюються в процесі окиснення. Вміст первинних продуктів окиснення ліпідної складової (пероксидів і гідропероксидів) характеризується величиною пероксидного числа (ПЧ). За допомогою рівняння (3) представлено апроксимаційну залежність величини ПЧ ліпідної складової емульсійної системи з β-каротином ($PI(T, \tau)$) від температури зберігання (T) і часу зберігання (τ).

$$PI(T, \tau) = 0,965 - 0,2895 \cdot T + 0,0065 \cdot \tau + 0,0425 \cdot T^2 + 0,0055 \cdot T \cdot \tau + 0,0004 \cdot \tau^2.$$

Поверхню отриманої залежності (3) наведено на рис. 3.

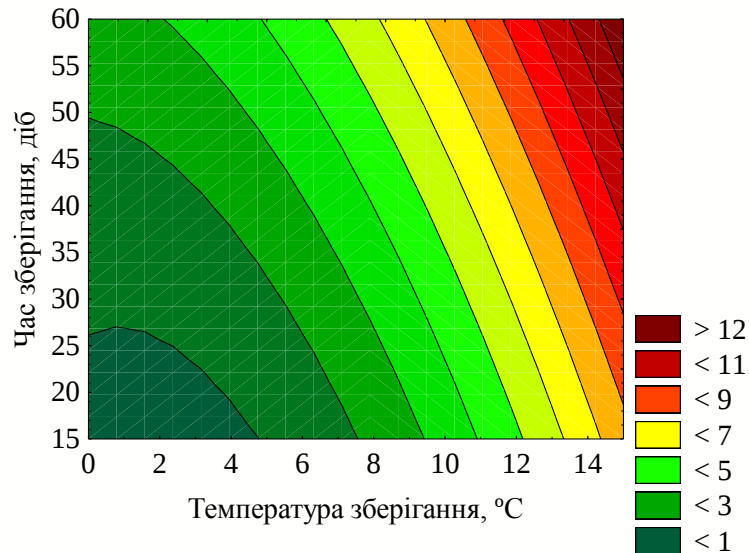


Рисунок 3 – Залежність величини пероксидного числа ліпідної складової емульсійної системи з β-каротином від температури і часу зберігання

Необхідно зазначити, що розрахована залежність (3) адекватно описує величину пероксидного числа в діапазоні зберігання за температур 0...15 °C і під час термінів

зберігання 15...60 діб. Величина ПЧ емульсійної системи, стабілізованої хітозаном (0,8 %) і ксантановою каміддю (0,1 %) з β -каротином (0,012 %) варіюється в діапазоні 1,1...13,4 ммоль $\frac{1}{2}\text{O}$ /кг.

Висновки

1. Визначено залежність окисної стабільності емульсійної системи, що містить конопляну олію від вмісту біополімерів – хітозану та ксантанової каміді під час прискореного окиснення. Запропоновано раціональний вміст стабілізаторів в емульсійній системі на основі конопляної олії (хітозан – 0,8...1,0 %; ксантанова камідь – 0,0...0,1 %). Період індукції прискореного окиснення за запропонованих умов збільшується на 44,4...47,2 % від такого ж в емульсійної системи, стабілізованої однією ксантановою каміддю.

2. Досліджено особливості гальмування окисного псування емульсійної системи розробленого складу за допомогою біологічно активного компоненту β -каротину. β -каротин ефективно взаємодіє з вільними радикалами, що утворюються на початкових етапах окиснення, запобігаючи їх подальшій реакції з ліпідами. Це призводить до зменшення утворення первинних та вторинних продуктів окиснення, які впливають на смак, запах та якість продукту. Доведено неадитивний взаємний вплив β -каротину та хітозану під час гальмування окисних процесів у складі модельного зразка емульсійної системи. Окреслено діапазон вмісту в модельних емульсійних системах β -каротину (0,012 %), при додаванні якого період індукції прискореного окиснення ліпідів збільшується в 1,58...2,08 разів в залежності від виду біополімерного стабілізаційного комплексу.

3. Досліджено величину пероксидного числа ліпідної складової емульсійної системи при зберіганні за різних температурних умов (0...15 °C) і протягом різних термінів зберігання (15...60 діб). Запропоновано двохфакторну квадратичну апроксимаційну залежність, яка пов'язує такі фактори як температура і час зберігання з величиною пероксидного числа (тобто вмістом первинних продуктів окиснення) ліпідної складової емульсійної системи. Оптимальні значення температури і часу зберігання емульсійної системи визначаються мінімізацією пероксидного числа, тобто мінімальними температурою та часом зберігання. Найбільш значущим фактором залежності є температура зберігання, що підтверджується найбільшим коефіцієнтом у рівнянні. Отриману апроксимаційну залежність рекомендовано застосовувати для контролювання та прогнозування динаміки накопичення первинних продуктів окиснення в ліпідній складовій емульсійної системи на основі конопляної олії під час зберігання.

Література

1. Kovaliova O., Tchoursinov Y., Kalyna V., Koshulko V., Kunitsia E., Chernukha A., Bezuglov O., Bogatov O., Polkovnychenko D., Grigorenko N. Identification of patterns in the production of a biologically-active component for food products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2, No. 11 (104). P. 61–68. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.200026.

2. Sytnik N., Kunitsa E., Mazaeva V., Chernukha A., Bezuglov O., Bogatov O., Beliuchenko D., Maksymov A., Popov M., Novik I. Determination of the influence of natural antioxidant concentrations on the shelf life of sunflower oil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, No. 11 (106). P. 55–82. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209000.
3. Petik P., Stankevych S., Zabrodina I., Zhulinska O., Mezentsseva I., Haliasnyi I., Hontar T., Shubina L., Kotliar O., Bondarenko S. Determination of fat-soluble dyes influence on the oxidation induction period of their oil solutions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 3, No. 6 (123). P. 13–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.279619.
4. Putyatin B., Bliznjuk O., Masalitina N., Bezpal'ko V., Zhukova L., Filenko O., Horiainova V., Ponomarova M., Ryabev A., Beliuchenko D. Identifying the influence of the concentration of surfactants on the technological indicators of aerosol emulsion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6, No. 6 (132). P. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.317819.
5. Serra J., Mura J., Fagoaga C., Castellano G. Oxidative stability of margarine is improved by adding natural antioxidants from herbs and spices. *Preprints*. 2023. DOI: 10.20944/preprints202305.1445.v1.
6. Demydova A., Aksonova O., Yevlash V., Tkachenko O., Kameneva N. Antioxidant activity of plant extracts of Ukrainian origin and their effect on the oxidative stability of sunflower oil. *Food Science and Technology*. 2022. Vol. 16, No. 3. P. 55–64. DOI: 10.15673/fst.v16i3.2514.
7. Felix-Sagaste K. G., Garcia-Carrasco M., Picos-Corrales L. A. Plant-animal extracts and biocompatible polymers forming oil-in-water emulsions: Formulations for food and pharmaceutical industries. *Hybrid Advances*. 2023. Vol. 3. P. 100072. DOI: 10.1016/j.hybadv.2023.100072.
8. Eisenkraft A., Falk A. The possible role of intravenous lipid emulsion in the treatment of chemical warfare agent poisoning. *Toxicology Reports*. 2016. Vol. 3. P. 202–210. DOI: 10.1016/j.toxrep.2015.12.007.
9. Mikołajczak N., Tańska M., Ogrodowska D. Phenolic compounds in plant oils: A review of composition, analytical methods, and effect on oxidative stability. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 113. P. 110–138. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.04.046.
10. Kunitsia E., Kalyna V., Haliasnyi I., Siedykh K., Kotliar O., Dikhtyar A., Polyansky P., Ivanov G., Baranova O., Bolhova N. Development of a flavored oil composition based on hemp oil with increased resistance to oxidation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 5, No. 11 (125). P. 26–33. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.287436.
11. Tian T., Liu Sh., Li L., Wang Sh. Soy protein fibrils– β -carotene interaction mechanisms: Toward high nutrient plant-based mayonnaise. *LWT*. 2023. Vol. 184. P. 114870. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.114870.
12. Kunitsia E., Popov M., Gontar T., Stankevych S., Zabrodina I., Stepankova G., Zolotukhina O., Filenko O., Novozhylova T., Nechyporenko D. Determination of the influence of hemp oil-based emulsion systems composition on the oxidation products content during storage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3, No. 6 (129). P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304466>.

Bibliography (transliterated)

1. Kovaliova O., Tchoursinov Y., Kalyna V., Koshulko V., Kunitsia E., Chernukha A., Bezuglov O., Bogatov O., Polkovnychenko D., Grigorenko N. Identification of patterns in the production of a biologically-active component for food products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2, No. 11 (104). P. 61–68. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.200026.
2. Sytnik N., Kunitsa E., Mazaeva V., Chernukha A., Bezuglov O., Bogatov O., Beliuchenko D., Maksymov A., Popov M., Novik I. Determination of the influence of natural antioxidant concentrations on the shelf life of sunflower oil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, No. 11 (106). P. 55–82. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209000.
3. Petik P., Stankevych S., Zabrodina I., Zhulinska O., Mezentseva I., Haliasnyi I., Hontar T., Shubina L., Kotliar O., Bondarenko S. Determination of fat-soluble dyes influence on the oxidation induction period of their oil solutions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 3, No. 6 (123). P. 13–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.279619.
4. Putyatin B., Bliznjuk O., Masalitina N., Bezpal'ko V., Zhukova L., Filenko O., Horiainova V., Ponomarova M., Ryabev A., Beliuchenko D. Identifying the influence of the concentration of surfactants on the technological indicators of aerosol emulsion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6, No. 6 (132). P. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.317819.
5. Serra J., Mura J., Fagoaga C., Castellano G. Oxidative stability of margarine is improved by adding natural antioxidants from herbs and spices. *Preprints*. 2023. DOI: 10.20944/preprints202305.1445.v1.
6. Demydova A., Aksonova O., Yevlash V., Tkachenko O., Kameneva N. Antioxidant activity of plant extracts of Ukrainian origin and their effect on the oxidative stability of sunflower oil. *Food Science and Technology*. 2022. Vol. 16, No. 3. P. 55–64. DOI: 10.15673/fst.v16i3.2514.
7. Felix-Sagaste K. G., Garcia-Carrasco M., Picos-Corrales L. A. Plant-animal extracts and biocompatible polymers forming oil-in-water emulsions: Formulations for food and pharmaceutical industries. *Hybrid Advances*. 2023. Vol. 3. P. 100072. DOI: 10.1016/j.hybadv.2023.100072.
8. Eisenkraft A., Falk A. The possible role of intravenous lipid emulsion in the treatment of chemical warfare agent poisoning. *Toxicology Reports*. 2016. Vol. 3. P. 202–210. DOI: 10.1016/j.toxrep.2015.12.007.
9. Mikołajczak N., Tańska M., Ogrodowska D. Phenolic compounds in plant oils: A review of composition, analytical methods, and effect on oxidative stability. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 113. P. 110–138. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.04.046.
10. Kunitsia E., Kalyna V., Haliasnyi I., Siedykh K., Kotliar O., Dikhtyar A., Polyansky P., Ivanov G., Baranova O., Bolhova N. Development of a flavored oil composition based on hemp oil with increased resistance to oxidation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 5, No. 11 (125). P. 26–33. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.287436.

11. Tian T., Liu Sh., Li L., Wang Sh. Soy protein fibrils– β -carotene interaction mechanisms: Toward high nutrient plant-based mayonnaise. *LWT*. 2023. Vol. 184. P. 114870. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.114870.

12. Kunitsia E., Popov M., Gontar T., Stankevych S., Zabrodina I., Stepankova G., Zolotukhina O., Filenko O., Novozhylova T., Nechyporenko D. Determination of the influence of hemp oil-based emulsion systems composition on the oxidation products content during storage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3, No. 6 (129). P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304466>.

УДК 66.061.5:577.1:615.07

О. М. Близнюк, д-р техн. наук, професор, Б. В. Путятін, аспірант,
С. В. Станкевич, канд. с.-г. наук, доцент, Я. О. Свіцова, канд. хім. наук, доцент,
Н. Ю. Масалітіна, канд. техн. наук, доцент, А. П. Белінська, канд. техн. наук, доцент

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ЕМУЛЬСІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БІОПОЛІМЕРІВ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ОКИСНОМУ ПСУВАННЮ БЕТА-КАРОТИНУ

Сучасні тенденції розвитку харчової та фармацевтичної промисловості висувають підвищені вимоги до стабільності біологічно активних компонентів у складі емульсійних систем. У даному дослідженні розглядається актуальна проблема запобігання окисному псуванню β -каротину – провітаміну А та антиоксиданту, який використовується у виробництві косметичних засобів. Об'єктом дослідження є емульсійні системи на основі конопляної олії, багатой поліненасиченими жирними кислотами (ПНЖК). Метою роботи була оптимізація складу емульсійних систем за рахунок використання біополімерів – хітозану та ксантанової камеді, які виконують функцію стабілізаторів та природних антиоксидантів.

Методологія дослідження включала комплексний підхід до оцінки окисної стабільності емульсійної системи. Встановлено, що оптимальний вміст хітозану становить 0,8–1,0 %, а ксантанової камеді – 0,0–0,1 %. Такі співвідношення дозволяють досягти максимальної стабілізації емульсії. Доведено, що додавання β -каротину до емульсійної системи в концентрації 0,012 % призводить до збільшення періоду індукції окиснення ліпідів у 1,58–2,08 рази, що є показником ефективності. Важливим аспектом дослідження є аналіз динаміки змін пероксидного числа ліпідної фази за різних температурних умов (0–15 °C) та тривалості зберігання (15–60 діб). Встановлено, що комбінація біополімерів з β -каротином дозволяє значно уповільнити процеси деградації біологічно активних компонентів.

Практична значимість роботи полягає у можливості застосування отриманих результатів для розробки нових поколінь стабільних до окиснення продуктів. Запропоновані композиції можуть бути використані при створенні косметичних препаратів з підвищеним вмістом біологічно активних речовин. Результати дослідження відкривають перспективи для подальших наукових розробок у галузі стабілізації емульсійних систем. Отримані дані також можуть бути корисними для оптимізації технологічних процесів виробництва емульсійних продуктів з підвищеною стійкістю до окиснення.

Ключові слова: емульсійна система, конопляна олія, біополімери, хітозан, ксантанова камідь, β -каротин, окисна стабільність.

O. M. Bliznjuk, B. V. Putyatin, S. V. Stankevych, Ya. O. Svishchova,
N. Yu. Masalitina, A. P. Belinska

**OPTIMIZATION OF EMULSION SYSTEMS COMPOSITION BASED ON
BIOPOLYMERS TO PREVENT OXIDATIVE DETERIORATION
OF BETA-CAROTINE**

Modern trends in the development of the food and pharmaceutical industries place increased demands on the stability of biologically active components in the composition of emulsion systems. This study considers the current problem of preventing oxidative deterioration of β -carotene – provitamin A and an antioxidant used in the production of cosmetics. The object of the study is emulsion systems based on hemp oil, rich in polyunsaturated fatty acids (PUFA). The aim of the work was to optimize the composition of emulsion systems by using biopolymers – chitosan and xanthan gum, which act as stabilizers and natural antioxidants.

The research methodology included a comprehensive approach to assessing the oxidative stability of the emulsion system. It was established that the optimal content of chitosan is 0.8–1.0 %, and xanthan gum – 0.0–0.1 %. Such ratios allow achieving maximum stabilization of the emulsion. It has been proven that the addition of β -carotene to the emulsion system at a concentration of 0.012 % leads to an increase in the period of lipid oxidation induction by 1.58–2.08 times, which is an indicator of effectiveness. An important aspect of the study is the analysis of the dynamics of changes in the peroxide value of the lipid phase under different temperature conditions (0–15 °C) and storage duration (15–60 days). It has been established that the combination of biopolymers with β -carotene allows to significantly slow down the degradation processes of biologically active components.

The practical significance of the work lies in the possibility of applying the obtained results to develop new generations of oxidation-stable products. The proposed compositions can be used in the creation of cosmetic preparations with a high content of biologically active substances. The results of the study open up prospects for further scientific developments in the field of stabilization of emulsion systems. The obtained data can also be useful for optimizing technological processes for the production of emulsion products with increased resistance to oxidation.

Keywords: emulsion system, hemp oil, biopolymers, chitosan, xanthan gum, β -carotene, oxidative stability.

М. О. Борисенко, аспірант, І. В. Сінкевич, канд. техн. наук, професор

ПОЛІМЕРНИЙ ВІСК ЯК ОСНОВА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ШЛІФУВАЛЬНО-ПОЛІРУВАЛЬНИХ ПАСТ

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
Харків, Україна*

Ключові слова: шліфувально-полірувальні пасти, вторинна сировина, полімери, зв'язувальна основа, термічний піроліз, полімерний віск, структура, властивості.

Вступ. Поступове вичерпання сировинних ресурсів для технологічних процесів виробництва нафтопродуктів сприяє збільшенню долі залучення альтернативної сировини, зокрема вторинної сировини – побічних (вторинних) продуктів або відходів виробництва та споживання. Особливо інтенсивно заміщення класичної сировини (висококиплячих нафтових фракцій) доцільно реалізовувати при виробництві шліфувально-полірувальних паст (ШПП), які можна вважати допоміжними матеріалами, що використовуються для досягнення необхідних характеристик поверхонь у різних галузях промисловості. При цьому, пошук та практичне застосування альтернативної сировини у виробництві ШПП має важливе економічне (зниження собівартості паст; зниження імпортозалежності; можливість локалізації виробництва на місцевій сировині), екологічне (зниження обсягів відходів та викидів CO₂), технологічне (розширення асортименту продукції) та соціальне (стимулювання розвитку малого та середнього бізнесу у сфері переробки вторинної сировини; створення нових робочих місць) значення.

Мета та постановка завдання дослідження. Відомо, що використання ШПФ забезпечує: усунення мікронерівностей, задирок, слідів механічної обробки; створення блиску та декоративного ефекту; зниження коефіцієнта тертя; покращення зносостійкості; підготовку до нанесення покриттів (гальванічних, лакофарбових, захисних) [1–3]. Склад ШПП завжди формується за принципом «абразив + зв'язувальна основа + допоміжні компоненти» [4, 5]. Причому, зв'язувальна основа (ЗО) – це ключовий компонент шліфувально-полірувальних паст, бо саме вона у складі ШПП виконує функції, що представлені на рис. 1.

Забезпечення фіксації абразиву у складі ШПП полягає в здатності ЗО рівномірно утримувати і розподіляти частинки абразиву, перешкоджаючи їх агрегації чи осіданню.

Забезпечення консистенції ШПП досягається регулюванням твердість/м'якість (від кремоподібної до твердої брускової). Консистенція ШПП визначає зручність її нанесення на поверхню та подальше використання.

Забезпечення пластичності та розмазуваності сприяє легке розтягування ШПП тонким шаром на оброблюваній поверхні. При цьому, значно підвищується якість обробленої поверхні.

Забезпечення стабільності суспензії уповільнює розшаровування абразиву та збільшує термін зберігання та використання ШПП.

Забезпечення функцій мастила проявляються у тепло- і зносостійкості (здатності витримувати тертя і температуру під час полірування; запобігання передчасному висиханню або розкладанню пасти) та змащувальній здатності (зменшення коефіцієнту тертя та охолодженні зони контакту інструмента і виробу).

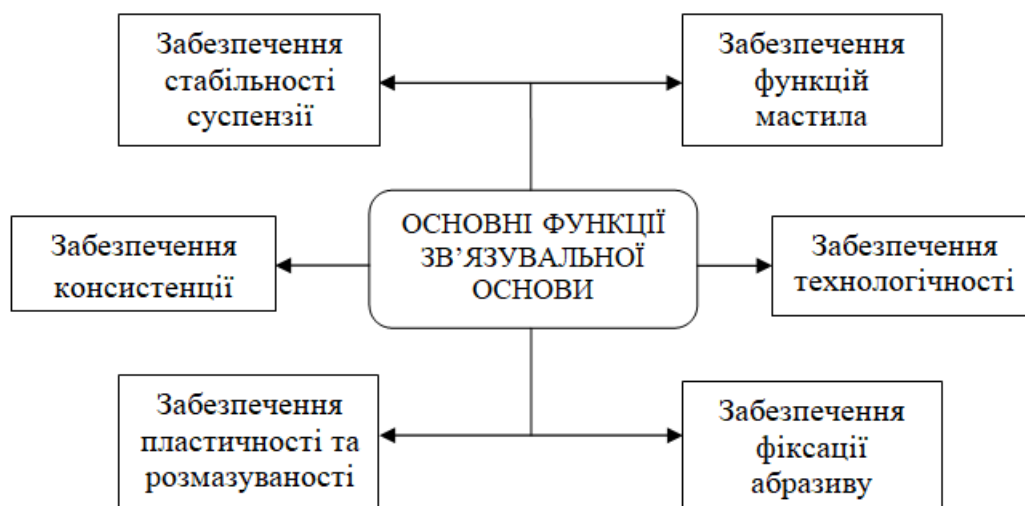


Рисунок 1 – Основні функції зв'язувальної основи у складі ШПП

Забезпечення технологічності дозволяє вводити до складу ШПП барвники, поверхнево-активні речовини (ПАР), пластифікатори тощо.

Сьогодні, до числа найпоширеніших ЗО, які вже тривалий час використовуються при виробництві ШПП: стеарин; жири; ланолін; вазелін; парафін; природні воски (бджолиний, карнаубський). Іноді використовують технічні оливи та мастила [6]. Разом з цим, недоліки, які виникають при використанні перелічи них вище ЗО у складі ШПП, представимо у вигляді структурної схеми, наведеної на рис. 2.

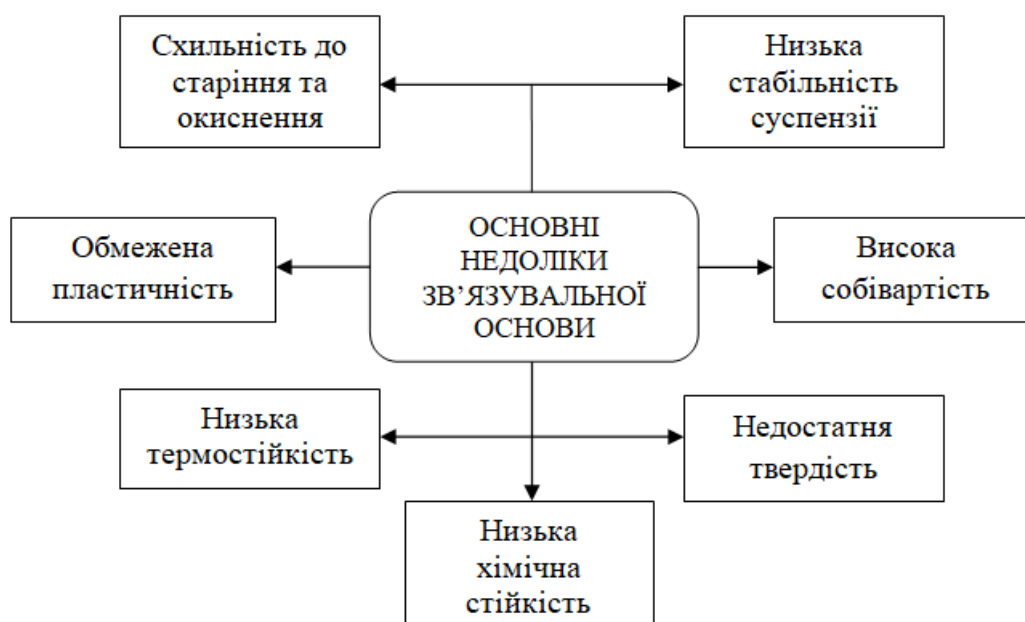


Рисунок 2 – Основні недоліки які виникають при використанні класичних ЗО у складі ШПП

Низька термостійкість ШПП при використанні більшості класичних ЗО виражається в тому, що при нагріванні під час полірування (вище 60–70 °С) вони

розм'якшуються або плавляться, що призводить до втрати форми ШПП та видалення абразиву.

Недостатня твердість ШПП з означеними вище ЗО, призводить до її швидкого стирання з поверхні, знижуючи продуктивність обробки.

Схильність до старіння та окиснення полягає в тому, що органічні жири й деякі воски з часом змінюють колір, жовтіють, утворюють плівки або стають крихкими.

Низька стабільність суспензії проявляється в тому, що частинки абразиву осідають, утворюючи грудки, а ШПП – втрачає однорідність.

Обмежена пластичність зумовлюється тим, що при високій концентрації абразиву (понад 70 %) паста розшаровується або кришиться.

Низька хімічна нестійкість виникає завдяки тому, що деякі традиційні жири ЗО взаємодіють із металами, утворюючи мильні нашарування.

Висока собівартість – деякі види ЗО (наприклад, бджолиний чи карнаубський віск) є дорогими та дефіцитними або мають цільове застосування в інших галузях промисловості.

Саме завдяки означеним вище недолікам, зараз активно ведуться пошуку альтернативних ЗО для виробництва ШПП, які здатні знижувати виробничі витрати та забезпечувати сталість існуючого виробництва.

Аналізуючи номенклатуру, обсяги утворення і накопичення, вартість відходів виробництва та споживання слід відмітити, що досить перспективною ЗО для виробництва ШПП можуть виступати, так звані, полімерні воски (ПВ), які можуть бути отримані при термічній або термо-каталітичній переробці відходів споживання у вигляді виробів з поліетиленів (ПЕ), поліпропілену (ПП) та полістиролу (ПС). Отже, дослідження особливостей отримання та можливості подальшого використання ПВ в якості ЗО для виробництва ШПП виступає метою даної роботи.

Аналіз публікацій. На сьогоднішній день, основним технологічним процесом переробки твердої полімерної сировини в газоподібні (алкани та алкени (C_2-C_4)), рідкі/тверді (фракції від C_{5+}) продукти та твердий коксоподібний залишок, виступає термічний або термо-каталітичний піроліз, який реалізується при температурах 380–450 °C та атмосферному (0,11–0,13 МПа) або підвищеному (1,0–3,0 МПа) тиску [7–10]. Зазвичай термо-каталітичний піроліз, використовують в тих випадках, коли необхідно отримати рідкі продукти – компоненти моторних палив, які відповідають вимогам (вміст сірки, бензолу та сумарної кількості ароматичних і поліциклічних ароматичних сполук) діючих стандартів екологічної безпеки Євро-4 та Євро-5 [11]. Термічний піроліз є більш простим у реалізації процесом та може бути застосованим для отримання ПО для виробництва ШПП.

Матеріали та методи дослідження. Вихідними матеріалами дослідження виступали вироби з ПЕ (HDPE PE100), ПП (PP-H Moplen HP500N) та ПС (PS Styron 685), які втратили свої споживчі властивості.

Стадії технології отримання ПВ з вихідної полімерної сировини, які реалізовувалися у лабораторному дослідженні, представимо у вигляді схеми, що наведена на рис. 3.

Підготовка сировини є аналогічною до підготовки, яка застосовувалась в роботі [12] та включає в себе сортування полімерних відходів (окремо ПЕ, ПП та ПС), подрібнення у шредерах до гранул/пластівців (5–20 мм), видалення забруднень (миття, сушіння, магнітна сепарація).

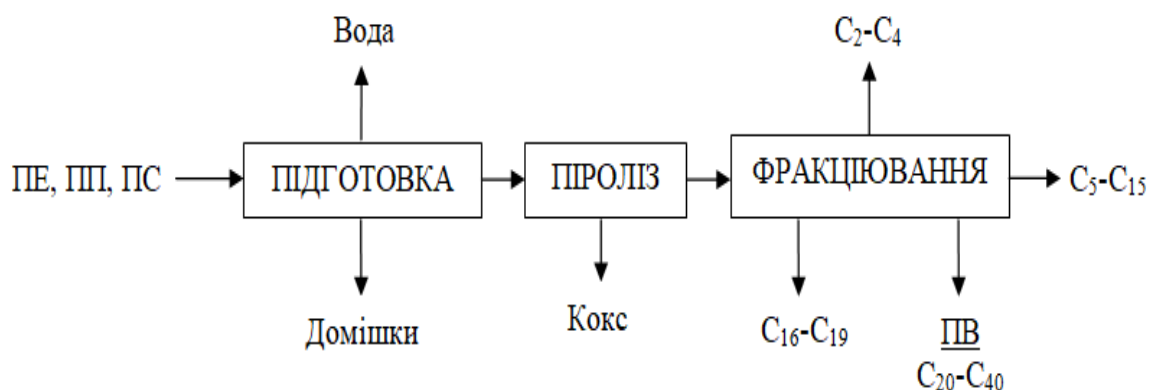


Рисунок 3 – Схема отримання ПВ

Піроліз підготовленої сировини реалізується в лабораторному товстостінному реакторі (трубчастий, реактор з мішалкою, шнековий) аналогічному за конструкцією до реактора, наведеного в роботах [13, 14] без доступу кисню при атмосферному тиску. Температурний діапазон піролізу, в залежності від типу полімерної сировини та її термостійкості складає: ПЕ – 400–420 °С; ПП – 380–400 °С; ПС – 350–380 °С.

Фракціонування продуктів утворених внаслідок розриву С–С-зв’язків дозволяло отримати вуглеводневі гази C_2-C_4 (суміш алканів та алкенів), рідку бензинову фракцію (C_5-C_{15}), дизельну фракцію ($C_{16}-C_{19}$) та фракцію ПВ ($C_{20}-C_{40}$) – цільовий продукт.

Лабораторне дослідження отриманого ПВ ($C_{20}-C_{40}$) включало в себе візуальну оцінку отриманого ПВ, визначення його температури початку кипіння (t , °С) за ASTM D86, густини (ρ , кг/м³) за ASTM D1475, пенетрація (x , мм×10⁻¹) за ASTM D217, стійкість до фазового розшарування (ψ , %) за ASTM D4424. Окрім цього використовувався метод Spreading Test, який дозволяє визначити показника розмазуваності пасти (y , см²) за наступною методикою: ПВ перемішують до однорідності, відбирають 0,5 г зразка. Далі, металеву пластину очищують і знежирюють спиртом. На центр пластини при температурі 25 °С наносять ВО, накривають зверху другою пластиною та прикладають стандартне навантаження (200 г протягом 60 с). Після зняття навантаження обводять контур плями та вимірюють діаметр по 2–3 напрямках. Обчислюють середній діаметр (d , см) та розраховують площу (S , см²) розмазування ПВ за формулою наступного вигляду:

$$S = \pi \times (d/2)^2. \quad (1)$$

Для кожної проби проводять не менше 3 визначень та визначають усередненне значення S .

Результати та їх обговорення. При лабораторному дослідженні ШПП першим і важливим етапом контролю якості як ШПП, так і ПВ, виступає візуальна оцінка. Вона не потребує складного обладнання та дозволяє оперативно виявити дефекти (розшарування, кристалізацію тощо). При цьому, колір свідчить про ступінь термічної деструкції або наявність домішок; прозорість / мутність виступає непрямим показником однорідності; консистенція відображає пластичність і можливість використання ПВ в якості зв’язувальної основи. Візуальна оцінка отриманого термічним піролізом ПВ, представлена в табл.1.

Таблиця 1 – Візуальні характеристики полімерних восків, отриманих з ПЕ, ПП та ПС

Полімер	Прозорість / колір	Консистенція / текстура	Особливості
ПЕ	напівпрозорий має солом'яний колір	Пластичний; м'який при кімнатній температурі	без запаху; добре формує однорідні блоки; при нагріванні стає текучим; пластичність дозволяє рівномірне розмазування пасти
ПП	непрозорий має світло-жовтий колір	Твердий; щільний, менш пластичний ніж з ПЕ	висока кристалічність; при нагріванні швидко стає текучою; має невелику маслянисту поверхню
ПС	непрозорий має фіолетовий колір	крихкий, ламкий; більш твердий ніж з ПП	менш пластичний; при охолодженні легко кришиться; має характерний слабкий запах при нагріванні швидко розм'якшується

Оцінюючи візуальні характеристики, представлені в табл. 1 слід зазначити, що пластичність ПЕ буде сприяти добре утримувати абразив і забезпечує легке розмазування пасти. Твердість ПП потрібна для формування паст з високим вмістом абразиву (70–90 %). Фіолетовий відтінок у ПВ, отриманого з ПС, зумовлений наявністю поліароматичних сполук (кетонів та хінонів), утворених під час термічної деструкції ароматичного кільця стиролу. Крихкість ПС обмежує його застосування у високонавантажених пастах, зате може бути корисна для спеціальних або декоративних паст. Інші, визначені під час дослідження показники якості ПВ, представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Показники якості ПВ, отриманих піролізом ПЕ, ПП та ПС

Показник	ПЕ (HDPE)	ПП (гомополімер)	ПС (GPPS)
Температура початку кипіння, °C	300		
Густина при 20 °C, (ρ), кг/м ³	910	937	1029
Пенетрація при 25 °C, (x), мм×10 ⁻¹	170	105	58
Стійкість до фазового розшарування (ψ), % утримання	98 (дуже стабільний)	93 (задовільний, може виділяти маслянисту фазу)	87 (схильний до сегрегації, нестійкий)
Розмазаність, (S), см ²	27	19	14

Згідно даних, представлених у табл. 2 зрозуміло, що ПВ, отриманий з ПЕ має найнижче значення ρ (910 кг/м^3), тому віск легший і більш пластичний. ПВ, отриманий з ПП є твердим і менш пластичним, а його ρ більша на 27 кг/м^3 за ПВ, отриманий з ПЕ. ПС має найвищу ρ (1029 кг/м^3) ніж ПЕ та ПП. Тому ПВ, отриманий з ПС віск має ρ на $92\text{--}119 \text{ кг/м}^3$ вищу, ніж ПВ, отримані з ПЕ та ПП. Відомо, що чим вище значення x , тим м'якший/пластичніший ПВ. Отже, ПВ, отриманий з ПЕ ($x = 170 \text{ мм} \times 10^{-1}$) є найм'якішим серед усіх ПВ, а ПВ, отриманий з ПС ($x = 58 \text{ мм} \times 10^{-1}$) – найтвердішим і ламким. Величина показника ψ свідчить про те, що ПВ, отриманий з ПЕ характеризується найбільш стабільною однорідною структурою ($\psi = 98 \%$). ПВ, отриманий з ПП має тенденцію до часткового виділення низькомолекулярної рідини ($\psi = 93 \%$). ПВ, отриманий з ПС є найменш стабільним та схильним до розшарування і сегрегації при центрифугуванні ($\psi = 87 \%$). ПВ, отриманий з ПЕ також, характеризується найвищим значенням показника S (27 см^2), що робить його цінною основою для виробництва м'яких ШПП. ПВ, отриманий з ПП, характеризується середнім значенням показника S (19 см^2), що підходить для жорсткіших паст з високим утриманням форми. ПВ, отриманий з ПС, характеризується низьким значенням показника S (14 см^2) через крихкість і залишкові ароматичні структури. Його використовується можна використовувати як основу для ШПП спеціального призначення, або у якості модифікатору до різних ШПП.

Порівнявши властивості, отриманих ПВ з класичними зв'язувальними основами ШПП – стеарином (полірувальні пасти для металів (латунь, мідь, алюміній тощо); пасти для оптичного скла й дзеркал) і парафіном (тверді полірувальні бруски (для сталі, інструментів, жорстких поверхонь); пасти для грубого шліфування, де потрібна жорстка і тверда матриця) [15], зазначимо, що ПВ на базі вторинних ПЕ, ПП та ПС, близькі до них за природою матеріали, але характеризуються більшими значеннями показників (x), (S) та (ψ). Отже, можуть виступати їх ефективними замінниками у складі ШПП.

Висновки. Пошук альтернативної сировини для виробництва ШПП, на сьогоднішній день, вважається економічно вигідним, екологічно доцільним та технологічно гнучким напрямом, який, у свою чергу, дозволяє створювати конкурентні продукти на основі вторинних матеріалів, зменшувати обсяги утворених відходів та забезпечувати сталий розвиток виробництва.

Перспективною альтернативною сировиною для виробництва ПВ – бази ШПП, яка забезпечить промислові об'єми виробництва, слід вважати вторинні полімери (ПЕ, ПП та ПС), а методом їх переробки – термічний піроліз. Причому, термічний піроліз, в даному випадку, виступає економічно доцільним процесом, який реалізується в установках реакторного типу з постійним перемішуванням реакційної суміші при температурах $350\text{--}420 \text{ }^\circ\text{C}$ (в залежності від полімерної сировини) та атмосферному тиску.

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити, що на базі переробки ПЕ можна отримати ПВ, який є м'яким/пластичним ($x = 170 \text{ мм} \times 10^{-1}$), характеризується порівняно високим значенням розмазуваності ($S = 27 \text{ см}^2$) та може бути використаний при виробництві м'яких ШПП. На базі переробки ПП можна отримати ПВ, який є помірно твердим, підтримує баланс пластичності/твердості ($x = 105 \text{ мм} \times 10^{-1}$), характеризується середнім значенням розмазуваності ($S = 19 \text{ см}^2$) та може бути використаний при виробництві жорстких ШПП. На базі переробки ПС можна отримати ПВ, який

є твердим/крихким, з обмеженою пластичністю ($\chi=58 \text{ мм} \times 10^{-1}$), характеризується низьким значенням розмазуваності ($S=14 \text{ см}^2$) та може бути використаний при виробництві ШПП спеціального призначення, або у якості модифікатору до різних ШПП.

Порівнюючи властивості отриманих ПВ з класичними зв'язувальними основами для ШПП – стеарином та парафіном, зазначимо, що вони можуть виступати їх ефективними заміниками при виробництві паст для грубого шліфування або полірування поверхні металів та композитних матеріалів.

Література

1. Ковалевський С. В., Онишук С. Г. Технологія обробки типових деталей і складання машин : навч. посіб. Тернопіль : ДДМА, 2023. 132 с.
2. Singh A., Shetty K. H., Prathap M. S. Finishing and polishing of direct composite restorations – a review. *International Journal of Advanced Research*. 2021. Vol. 9, No. 6. P. 193–204. DOI: 10.21474/IJAR01/13000.
3. Bray S. Grinding, Honing, and Polishing for Home Machinists. Fox Chapel Publishing Company, Incorporated, 2025. 96 p.
4. Bańkowski D., Spadło S. The influence of abrasive paste on the effects of vibratory machining of brass. *Archives of Foundry Engineering*. 2019. Vol. 19, No. 4. P. 5–10.
5. A kind of diamond paste : пат. CN104017499В Китай ; заявник Guizhou Rong Qing Tools Co Ltd. Опубл. 19.08.2015.
6. Макаров В. А., Мастепан М. А., Виноградов М. С., Беляев Д. С. Експериментальне дослідження впливу зернистості абразиву силікатної пасту на якість поверхонь тертя. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2022. Вип. 1(15). С. 100–105.
7. Nisar J., Ali G., Shah A., Farooqi Z. H., Iqbal M., Khan S., Sherazi S. T. H., Sirajuddin. Production of fuel oil and combustible gases from pyrolysis of polystyrene waste: kinetics and thermodynamics interpretation. *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 24. Article 101996. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101996.
8. Ranskiy A., Gordienko O., Korinenko B., Ishchenko V., Sakalova H., Vasylynych T., Malovanyy M., Kryklyvyi R. Pyrolysis processing of polymer waste components of electronic products. *Chemical and Chemical Technology*. 2024. Vol. 18, No. 1. P. 103–108.
9. Dragomir R. E. The kinetic and experimental study for the pyrolysis of hydrotreated and non-hydrotreated coking distilled fractions. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2024. Vol. 137. P. 2599–2615. DOI: 10.1007/s11144-024-02660-8.
10. Zhao N., Low S. S., Law C. L., Wu T., Pang C. H. Co-pyrolysis of polymers: recent advances, challenges and perspectives. *Fuel Processing Technology*. 2025. Vol. 274. Article 108239. DOI: 10.1016/j.fuproc.2025.108239.
11. ДСТУ 7687:2015. Бензини автомобільні Євро. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 15 с.
12. Grigorov A., Nahliuk I., Zelenskii O., Ponomarenko N. Technology of recycling waste lubricant greases. *Petroleum & Coal*. 2019. Vol. 61, No. 4. P. 677–681.
13. Grigorov A., Zelenskii O., Sytnik A., Nahliuk I. Possibility of producing plastic lubricants by thermal destruction of solid domestic wastes. *Petroleum & Coal*. 2020. Vol. 62, No. 1. P. 195–199.

14. Шевченко К. В., Григоров А. Б. Отримання компоненту котельного палива з вторинного поліпропілену. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. № 4. С. 83–89.

15. Бодрова Л. Г., Крамар Г. М., Ковальчук Я. О., Коваль І. В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство : навч. посіб. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2023. 157 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kovalevskiy S. V., Onyshchuk S. H. Tekhnolohiia obrobky typovykh detalei i skladannia mashyn : navch. posib. Ternopil : DDMA, 2023. 132 p.

2. Singh A., Shetty K. H., Prathap M. S. Finishing and polishing of direct composite restorations – a review. *International Journal of Advanced Research*. 2021. Vol. 9, No. 6. P. 193–204. DOI: 10.21474/IJAR01/13000.

3. Bray S. Grinding, Honing, and Polishing for Home Machinists. Fox Chapel Publishing Company, Incorporated, 2025. 96 p.

4. Bańkowski D., Spadło S. The influence of abrasive paste on the effects of vibratory machining of brass. *Archives of Foundry Engineering*. 2019. Vol. 19, No. 4. P. 5–10.

5. A kind of diamond paste : pat. CN104017499B Kytai ; zaiavnyk Guizhou Rong Qing Tools Co Ltd. Opubl. 19.08.2015.

6. Makarov V. A., Mastepan M. A., Vynohradov M. S., Bieliaiev D. S. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu zernystosti abrazyvu sylikatnoi pasty na yakist poverkhon tertia. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*. 2022. Vyp. 1(15). P. 100–105.

7. Nisar J., Ali G., Shah A., Farooqi Z. H., Iqbal M., Khan S., Sherazi S. T. H., Sirajuddin. Production of fuel oil and combustible gases from pyrolysis of polystyrene waste: kinetics and thermodynamics interpretation. *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 24. Article 101996. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101996.

8. Ranskiy A., Gordienko O., Korinenko B., Ishchenko V., Sakalova H., Vasylynych T., Malovanyy M., Kryklyvyi R. Pyrolysis processing of polymer waste components of electronic products. *Chemical and Chemical Technology*. 2024. Vol. 18, No. 1. P. 103–108.

9. Dragomir R. E. The kinetic and experimental study for the pyrolysis of hydrotreated and non-hydrotreated coking distilled fractions. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2024. Vol. 137. P. 2599–2615. DOI: 10.1007/s11144-024-02660-8.

10. Zhao N., Low S. S., Law C. L., Wu T., Pang C. H. Co-pyrolysis of polymers: recent advances, challenges and perspectives. *Fuel Processing Technology*. 2025. Vol. 274. Article 108239. DOI: 10.1016/j.fuproc.2025.108239.

11. DSTU 7687:2015. Benzyny avtomobilni Yevro. Tekhnichni umovy. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 2015. 15 p.

12. Grigorov A., Nahliuk I., Zelenskii O., Ponomarenko N. Technology of recycling waste lubricant greases. *Petroleum & Coal*. 2019. Vol. 61, No. 4. P. 677–681.

13. Grigorov A., Zelenskii O., Sytnik A., Nahliuk I. Possibility of producing plastic lubricants by thermal destruction of solid domestic wastes. *Petroleum & Coal*. 2020. Vol. 62, No. 1. P. 195–199.

14. Shevchenko K. V., Hryhorov A. B. Otrymannia komponentu kotelnoho palyva z vtorynnoho polipropilenu. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2020. No. 4. P. 83–89.

15. Bodrova L. H., Kramar H. M., Kovalchuk Ya. O., Koval I. V. Tekhnolohiia konstruktivnykh materialiv ta materialoznavstvo : navch. posib. Ternopil : FOP Palianytsia V. A., 2023. 157 p.

УДК 621.921

М. О. Борисенко, І. В. Сінкевич

ПОЛІМЕРНИЙ ВІСК ЯК ОСНОВА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ШЛІФУВАЛЬНО-ПОЛІРУВАЛЬНИХ ПАСТ

В статті розглянуто принципову можливість розширення сировинної бази виробництва шліфувально-полірувальних паст за рахунок вторинної сировини – виробів з поліетилену, поліпропілену та полістиролу, які втратили свої споживчі властивості. Ці вироби, сьогодні, відносяться до наймасовіших твердих побутових відходів, які через низьку біодеградацію (час розкладання 100–500 років), накопичуються на спеціально обладнаних полігонах і сміттєзвалищах, зменшуючи площину сільсько-господарських угідь. Разом з цим, вторинна полімерна сировина, може розглядатися в якості цінного джерела сировини для отримання полімерних восків – бази для виробництва шліфувально-полірувальних паст. При цьому, економічно доцільним процесом переробки вторинної полімерної сировини, виступає термічний піроліз, який реалізується в установках реакторного типу при температурах 350–420 °С (в залежності від термічної стійкості полімерної сировини) та атмосферному тиску. В процесі проведення термічного піролізу в лабораторних умовах було отримано зразки полімерних восків (фракцій, що википають при температурах понад 300 °С), які мали наступні властивості: поліетиленовий віск (густина при 20 °С – 910 кг/м³; пенетрація при 25 °С – 170 мм×10⁻¹; стійкість до фазового розшарування – 98 % утримання; розмазуваність – 27 см²); поліпропіленовий віск (густина при 20 °С – 937 кг/м³; пенетрація при 25 °С – 105 мм×10⁻¹; стійкість до фазового розшарування – 93 % утримання; розмазуваність – 19 см²) та полістирольний віск (густина при 20 °С – 1029 кг/м³; пенетрація при 25 °С – 58 мм×10⁻¹; стійкість до фазового розшарування – 87 % утримання; розмазуваність – 14 см²). Отримані результати показали, що досліджені полімерні воски за своїми властивостями перевершують класичні зв'язувальні основи шліфувально-полірувальних паст – стеарин та парафін. Отже, можуть виступати їх заміниками при промисловому виробництві широкого спектру шліфувально-полірувальних паст, що в свою чергу буде сприяти зниженню собівартості їх виробництва та імпортозалежності.

Ключові слова: шліфувально-полірувальні пасти, вторинна сировина, полімери, зв'язувальна основа, термічний піроліз, полімерний віск, структура, властивості.

M. O. Borysenko, I. V. Sinkevych

POLYMER WAX AS A BASIS FOR THE PRODUCTION OF GRINDING AND POLISHING PASTE

The article considers the fundamental possibility of expanding the raw material base for the production of grinding and polishing pastes at the expense of secondary raw materials – products made of polyethylene, polypropylene and polystyrene, which have lost their consumer properties. These products, today, are among the most massive solid household waste, which, due to low biodegradation (decomposition time 100–500 years), accumulate in specially equipped landfills and landfills, reducing the area of agricultural land. At the same time, secondary polymer raw materials can be considered as a valuable source of raw materials for obtaining polymer waxes – the base for the production of grinding and polishing pastes. At the same time, an economically feasible process for processing secondary polymer raw materials is thermal pyrolysis, which is implemented in reactor-type installations at temperatures of 350–420 °C (depending on the thermal stability of the polymer raw materials) and atmospheric pressure. In the process of thermal pyrolysis in laboratory conditions, samples of polymer waxes (fractions boiling at temperatures above 300 °C) were obtained, which had the following properties: polyethylene wax (density at 20 °C – 910 kg/m³; penetration at 25 °C – 170 mm×10⁻¹; resistance to phase separation – 98 % retention; spreadability – 27 cm²); polypropylene wax (density at 20 °C – 937 kg/m³; penetration at 25 °C – 105 mm×10⁻¹; resistance to phase separation – 93 % retention; spreadability – 19 cm²) and polystyrene wax (density at 20 °C – 1029 kg/m³; penetration at 25 °C – 58 mm×10⁻¹; resistance to phase separation – 87 % retention; spreadability – 14 cm²). The results obtained showed that the studied polymer waxes surpass the classical binding bases of grinding and polishing pastes – stearin and paraffin. Therefore, they can act as their substitutes in the industrial production of a wide range of grinding and polishing pastes, which in turn will contribute to reducing the cost of their production and import dependence.

Keywords: grinding and polishing pastes, secondary raw materials, polymers, binder, thermal pyrolysis, polymer wax, structure, properties.

А. Я. Гаїпов, А. Б. Григоров, д-р техн. наук, професор

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА НА БАЗІ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ ІЗОЛЯЦІЙНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ НАФТО- ТА ГАЗОПРОВОДІВ

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
Харків, Україна*

Ключові слова: захисні покриття, ізоляційні вуглеводневі матеріали, корозія, вторинна сировина, підготовка, переробка, кислий гудрон, полімери, відпрацьовані оливи, властивості.

Вступ. Сьогодні, в якості пасивних засобів захисту від атмосферної та електрохімічної корозії нафто- та газопроводів досить широко застосовуються різні типи захисних покриттів, які наносяться на металеву поверхню труб. Від цілісності та фізико-хімічних, фізико-механічних властивостей цих покриттів, зокрема їх гідрофобності, стійкості до впливу температур, агресивних речовин та механічного навантаження, здебільшого залежить надійна експлуатація нафто- та газотранспортних мереж [1]. Означені мережі забезпечують функціонування та сталий розвиток промисловості України, а роботи, спрямовані на підтримання їх в робочому стані протягом тривалого часу експлуатації, відносяться до актуальних завдань сьогодення. Разом з тим, сучасні тенденції, що склалися за останні десятиріччя у промисловості, змушують здійснювати пошук більш дешевої сировини та впроваджувати енергоефективні технології її переробки. Саме такою сировиною, з огляду на її властивості, виступає вторинна сировина – відходи виробництва та споживання.

Мета та постановка завдання дослідження. Відомо, що вибір сировини для виробництва захисних покриттів для нафто- та газопроводів, здебільшого залежить від типу покриття (антикорозійного, ізоляційного, термозахисного тощо) та умов експлуатації трубопроводу (температура, вологість, хімічна агресивність середовища, ґрунт та інше) [2, 3]. Основні типи захисних покриттів, які сьогодні досить широко застосовуються у промисловості для обробки металевих поверхонь труб нафто- та газопроводів, представлені у вигляді структурної схеми на рис. 1.

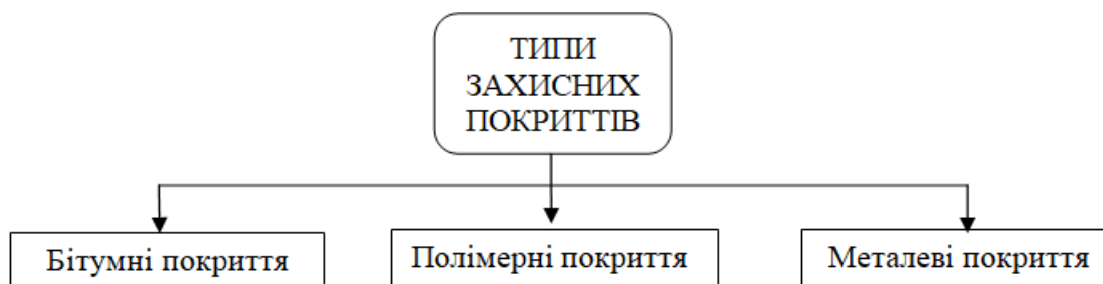


Рисунок 1 – Основні типи захисних покриттів для нафто- та газопроводів

Полімерні покриття (зокрема поліетиленові, поліпропіленові, епоксидні, поліуретанові тощо) широко використовуються для захисту нафто- та газопроводів завдяки своїм чудовим антикорозійним і механічним властивостям [4]. Проте, вони мають низку недоліків, які слід враховувати при проектуванні та експлуатації трубопроводів. Основні недоліки полімерних покриттів проявляються у наступному [5]: чутливість до підготовки поверхні (полімерні покриття вимагають ідеально очищеної металевої поверхні, інакше відбувається прискорене відшарування покриття та корозія металевої поверхні); низька ударостійкість і крихкість при низьких температурах (деякі полімери стають крихкими на морозі та можуть тріскатися при ударах або згинанні, що критично під час транспортування або монтажу труб взимку); обмежена термостійкість (більшість полімерних покриттів витримують температуру до 85–100 °С, рідше до 140 °С – при вищих температурах полімери розм'якшуються та втрачають свої експлуатаційні властивості); ультрафіолетова деградація (поліетилен і поліпропілен схильні до руйнування під дією ультрафіолету; при тривалому зберіганні труб на відкритому повітрі без захисту, відбувається старіння полімерів – втрата еластичності, тріщини тощо); висока вартість і складність нанесення (необхідність дотримання точних температурних режимів, використання спеціального обладнання, необхідність здійснення контролю товщини та адгезії); складність ремонту в польових умовах (необхідність використання спеціальних ремонтних комплектів або нагрівальних пристроїв); виникнення підплівкової корозії та катодного відшарування (при порушенні адгезії, волога може потрапити під покриття викликаючи корозію; при катодному відшаруванні полімерне покриття втрачає контакт зі металевою поверхнею). Отже полімерні покриття здатні забезпечити високий рівень захисту, але вимагають ретельного контролю технології нанесення, якісної підготовки основи, дотримання температурного режиму та професійного монтажу. Для максимальної ефективності рекомендується використовувати полімерні покриття в поєднанні з катодним захистом і регулярним моніторингом стану трубопроводу.

Металеві покриття (переважно цинкові, алюмінієві та їхні сплави) використовуються у трубопровідній галузі [6], але їх поширення обмежене через низку наступних технологічних, економічних і експлуатаційних причин: низька діелектрична здатність (не забезпечують ізоляції від електроструму чи вологи); низька ефективність при катодному захисті (при наявності зовнішнього катодного захисту (СР) цинкове покриття може самостійно руйнуватися (перетворюється на анод); недостатній бар'єрний захист (металеве покриття захищає сталь, але волога може проникати до основи металу); складність ремонту пошкоджень (неможливо відновити гаряче цинкування в польових умовах до заводського рівня; для ремонту потрібні спеціальні сплави або паста, які часто мають гірші захисні властивості); низька ударна міцність (металеве покриття (особливо гальванічне або напилене) крихке, схильне до відшарування, сколювання при ударах або вигинах труби); обмежена термостійкість (при температурах > 200 °С цинк випаровується або окислюється, покриття втрачає захисні властивості – відбувається взаємодія зі сталлю); висока вартість та складність нанесення (гаряче цинкування і металізація потребують високих температур, спеціального обладнання, витрат на утилізацію відходів (шлаки, флюси), підвищеного енергоспоживання); обмежений термін служби (покриття повільно, але неминуче руйнується з часом, у вологих або агресивних середовищах деградація прискорюється); слабка ефективність у вологому або кислому ґрунті (цинк кородує швидше в кислотному, засоленому чи болотистому ґрунті, тому потрібне додаткове ізолювання (наприклад, стрічки, полімерна плівка)). Хоча металеві покриття (цинк, алюміній) добре працюють у атмосферних умовах, вони не можуть замінити по-

вноцінний бар'єрний захист, як полімери [7]. Для ґрунтових або підводних умов їх використовують лише в комбінації з іншими системами.

Бітумні покриття починаючи з середини ХХ століття і до тепер лишаються досить розповсюдженим матеріалом для антикорозійного захисту трубопроводів різного функціонального призначення [8]. Даний тип захисного покриття досить поширений у країнах СНГ, Східній Європі та Азії. З розвитком виробництва нових полімерних матеріалів з підвищеним рівнем фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей роль бітумного захисного покриття дещо зменшилася [9]. Сьогодні бітум, зазвичай, використовується при ремонті старих ділянок трубопроводів, що вже мають бітумне покриття, для захисту тимчасових мереж, каналізаційних, зливових та технологічних трубопроводів у сільському господарстві, комунальному секторі та будівництві [10]. До числа основних недоліків бітумного покриття слід віднести наступні [8, 11]: низька термостійкість (температура розм'якшення – 50–60 °С, тому він не підходить для трубопроводів, що транспортують гарячі рідини або експлуатуються в спекотному кліматі); схильність до старіння та крихкості; низька водостійкість при мікропошкодженнях (у разі тріщин або розривів волога легко проникає під покриття); низька механічна міцність (бітумне покриття легко пошкоджується при ударах, терті, згинах); пожежонебезпечність (нафтовий бітум – горючий матеріал); чутливість до якості нанесення (для надійного захисту потрібно правильне співвідношення температури матеріалу та поверхні, а товщина шару покриття, зазвичай не повинна бути менше 3 мм); низька зручність зберігання та транспортування (у спекотну погоду покриття може деформуватися або прилипати, у холодну – стає твердим і крихким, ламається при згині труб); низька хімічна стійкість (бітум проявляє низьку стійкість до дії деяких розчинників, нафтопродуктів, кислот); недовговічність (строк служби бітумного покриття – 10–20 років); екологічні обмеження (при виробництві, нагріванні і утилізації виділяються шкідливі речовини; у багатьох країнах використання бітуму обмежене через екологічний вплив [12, 13]). Отже, бітумні покриття остаються найдешевшим матеріалом у порівнянні з полімерними та металевими покриттями, але, внаслідок низького рівня експлуатаційних властивостей сьогодні використовуються лише на допоміжних технічних трубопроводах, при реконструкції старих мереж або як тимчасовий захист.

Частково позбутися недоліків, розглянутих вище захисних покриттів для нафто- та газопроводів, можна за рахунок розробки та промислового впровадження технології виробництва альтернативних покриттів – ізоляційних вуглеводневих матеріалів (ІВМ) на базі вуглеводневої основи (вуглеводневі фракції кислого гудрону та нафтового шламу), модифікатору (термопластичний компонент – вторинний поліетилен (ПЕ), поліпропілен (ПП) або подрібнені відпрацьовані автомобільні шини), активуючої речовини (кисень, пероксиди тощо) та пластифікатору (відпрацьовані змащувальні оливи) [14, 15].

Альтернативне покриття – ІВМ, представляє собою композиційну систему, що має ряд переваг перед класичними захисними покриттями. До потенційних переваг ІВМ також можна віднести: високу заповнюваність пор і нерівностей – в'язка структура дозволяє добре покривати нерівні поверхні та шви; хороша гідрофобність – базові компоненти (вуглеводневі фракції, полімери) мають високу водовідштовхувальну здатність; сумісність з антикорозійними добавками – легко модифікується інгібіторами корозії, стабілізаторами, УФ-абсорбентами; можливість армування – легко комбінується зі скловолокном, геотекстилем для підвищення міцності.

Таким чином, альтернативне покриття – ІВМ є досить перспективним матеріалом, особливо з огляду на можливість утилізації небезпечних промислових відходів

(відходи нафтопереробки або полімерні відходи), порівнянню дешевизни та простоту нанесення і ремонту покриттів трубопроводів в польових умовах. Разом з тим, поки що такі покриття не можуть повністю замінити сучасні сертифіковані полімерні системи FBE, 3LPE [16] у критично важливих об'єктах – магістралях високого тиску, підводних або транскордонних мережах. Незважаючи на це, означений напрямок є досить перспективним у сфері виробництва високоефективних покриттів для захисту нафто- та газопроводів від атмосферної та електрохімічної корозії. Отже, нижче розглянемо технологічні основи виробництва таких ІВМ (наприклад, з використанням фракції кислого гудрону, вторинних поліолефінів, відпрацьованих автомобільних шин, відпрацьованих змащувальних оливо) та проаналізуємо можливість інтегрування такого виробництва у діючі схеми, які реалізуються сьогодні на підприємствах нафтопереробної та нафтохімічної галузі України.

Результати та їх обговорення. Технологічна схема виробництва ІВМ повинна поєднувати в себе як попередню підготовку сировинних компонентів (вуглеводневої основи (ВО), модифікатору (М) та пластифікатору (П)), так і їх подальшу переробку.

Попередня підготовка сировинних компонентів. В якості вуглеводневої основи для виробництва ІВМ запропонувано використовувати продукт, отриманий при нейтралізації та зневодненні проб кислого гудрону (див. рис. 2), що утворюється при контактному очищенні різних нафтопродуктів концентрованою (93–98 %, $\rho^{20}=1,78\text{--}1,84\text{ г/дм}^3$) сірчаною кислотою (H_2SO_4) на підприємствах нафтохімічної галузі України [17].

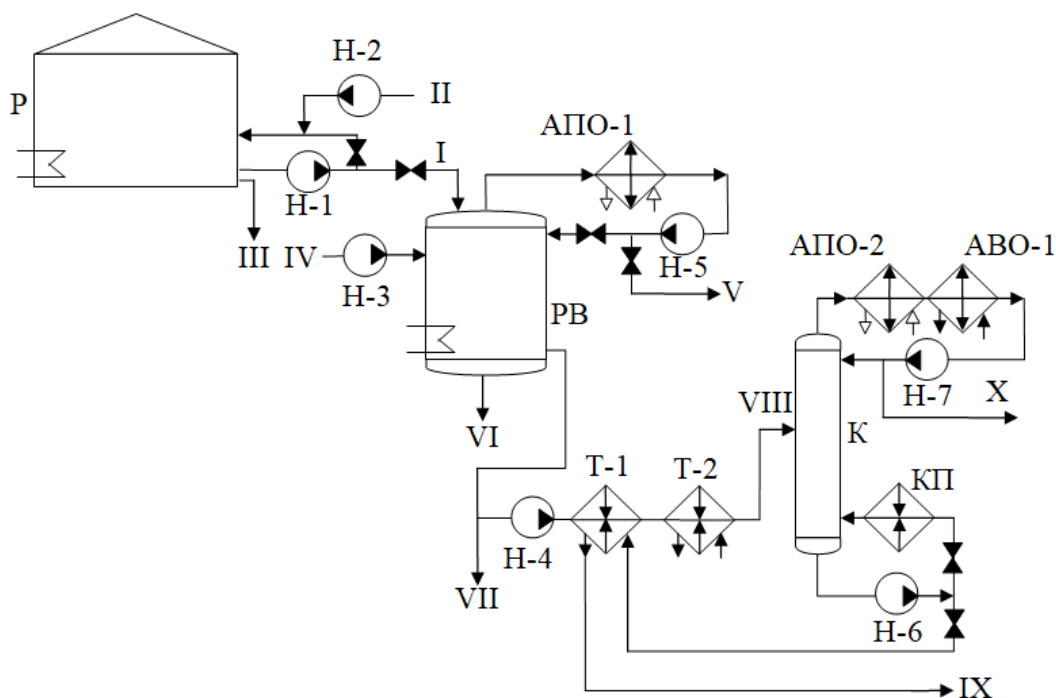


Рисунок 2 – Комбінована принципова схема підготовки ВО з використанням реактору-випаровувача

Запропонована схема (див. рис. 2) передбачає видалення кислих компонентів зі складу кислого гудрону за рахунок їх розчинення у воді, яке відбувається під час кип'ятіння кислого гудрону у воді в реакторі-випаровувачі (РВ). Сировина (потік I) за

допомогою насосу (Н-1) надходить до РВ, куди за допомогою насосу (Н-3) закачується вода (потік IV) у співвідношенні 1:1÷1:7 (на вихідну сировину). Після цього, температура в РВ підіймається до 100 ± 1 °С і, власне, проводиться кип'ятіння протягом 60–120 хв. Під час кип'ятіння, задля збереження постійного співвідношення «кислий гудрон : вода» в РВ передбачено охолодження та конденсація парів води за допомогою апарату повітряного охолодження (АПО-1) та подальшим її поверненням до РВ за допомогою насосу (Н-5).

По закінченню кип'ятіння в РВ підіймають температуру до 120 °С та за допомогою вентилів виводять з установки охолоджену (до 40–50 °С) воду (потік V). В РВ також передбачено вивантаження шламу (потік VI) через нижній злив. Далі вуглеводнева фракція (потік VII) насосом (Н-3) прокачується крізь теплообмінники (Т-1, Т-2) підігрівачись до необхідної температури (200–300 °С) подається до простої ректифікаційної колони (К).

В (Т-1) підігрівання вуглеводневої фракції (потік VIII) здійснюється за рахунок надлишкового тепла концентрованої фракції. Колонна (К) за необхідністю, може працювати як при атмосферному (0,11–0,13 МПа), так і залишковому (30–60 кПа) тиску. В (К) відбувається концентрування вуглеводневої фракції (до $t_{п.к.} = 200\text{--}350(380)$ °С), яка виводиться з низу (К) за допомогою насосу (Н-6), поділяється на два потоки. Перший потік задля підтримання температури в низу (К), прокачується через кип'ятильник (КП) та повертається у нижню частину (К); другий – прокачується через (Т-1), а далі виводиться з установки (потік IX).

Пари дистильованих вуглеводневих фракцій виходячи з верху (К), проходять апарат повітряного охолодження (АПО-2), апарат водяного охолодження (АВО-1), поділяються на два потоки. Перший потік за допомогою насосу (Н-7) повертається в (К) в якості холодного зрошення; другий з температурою 40–50 °С – виводиться з установки (потік X).

Схема, що наведена на рис. 2, хоча і має досить складне, стійке до агресивних середовищ обладнання, але дозволяє здійснити підготовку кислого гудрону – промислового відходу, який сьогодні, майже не переробляється, а зберігаються в відкритих озерах. Таким чином, загальні вимоги, які можна сформулювати до підготовленої ВО, яка в подальшому буде використовуватися при виробництві ІВМ, представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Загальні вимоги до підготовленої ВО

Найменування показника	Одиниці виміру	Числове значення
Вміст води, в межах	% мас.	0,20–0,60
Вміст механічних домішок, в межах	% мас.	0,15–0,55
Вміст летких вуглеводнів (межа википання до 120 °С),	% мас.	< 3
Наявність водорозчинних кислот та лугів	–	Відсутність
Кінематична в'язкість при 100 °С, не більше	мм ² /с	90
Корозійна дія на метал (сталь), не більше	Бали	1b
Небезпечність, не вище	Клас	III-IV

Сформульовані в табл. 1 вимоги визначені з огляду на можливості діючих виробництв (навантаження на обладнання, варіювання технологічного обладнання, виробничі витрати тощо) та перспективи інтегрування до них запропонованих схем.

Стосовно модифікаторів слід зазначити, що у запропонованій схемі в якості першого модифікатору (M_1) використовується поліетилен низької густини (LDPE), а в якості другого модифікатору (M_2) – відпрацьовані автомобільні шини (ВАШ). Підготовка M не менше важливий процес ніж підготовка ВО. В залежності від фазового стану M його підготовка складається з різних, послідовних та взаємопов'язаних стадій. Так, при підготовці M_1 , що представлені твердими поліолефінами (LDPE, HDPE, PP) основними технологічними етапами виступають сортування за видами, подрібнення промивка, просушка [18].

Власне процес подрібнення реалізується в шредерах та роторних дробарках. Він сприяє зменшенню габаритних розмірів заводського обладнання та інтенсифікації процесів переробки внаслідок збільшення площі реакційної поверхні. Процес дроблення у дробарках відбувається у наступний спосіб: сировина за допомогою конвеєру, завантажується в бункер і далі надходить до ротору, який за рахунок своєї маси обертається навколо горизонтальної осі та розташований всередині дробильної камери. Сировина захоплюються ножами і подрібнюються завдяки стиранню та ударам. По закінченню подрібнення, сировина зсипається між ротором та калібрувальною решіткою, яка знаходиться в камері подрібнення, в розвантажувальний бункер.

Промивка реалізується у спеціальних промивних ваннах флотації за допомогою мильних розчинів та дозволяє відокремити від полімерів забруднень (випадкових сторонніх включень), який потрапив на їх поверхню під час використання, транспортування та зберігання. Цей бруд негативно впливає на технологічне обладнання (викликає засмічення та абразивний знос) та на якість кінцевого продукту – ІВМ. Іноді, при забрудненні сировини хімічними реагентами, використовують кип'ятіння у слабкому розчині ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) з подальшим промиванням водою. Процес промивки реалізується у наступний спосіб: сировина надходить в зону завантаження ванни. Вона залишається на поверхні води та за допомогою транспортувальних барабанів просувається вздовж ванни, де відбувається інтенсивне відмивання сировини та нейтралізація агресивних середовищ у воді. Після цього сировина надходить до вивантажувального барабану, де і відокремлюється сировина від води.

Далі сировина переміщується до бункеру шнекового вивантажувального транспортеру. Після промивки полімерна сировини може зберігати до 5 % вологи, яка є енергетичним баластом у виробництві та унеможлиблює проведення де-яких технологічних операцій. Для її видалення, зазвичай, використовують просушку шляхом продування крізь подрібнені полімери гарячого (100–120 °C) сухого (температура точки роси не менше 30 °C) повітря.

Підготовка M_2 – ВАШ практично нічим не відрізняється від підготовки M_1 , лише додатково може реалізовуватися стадія вилучення із гумової крихти металевго кордону [19]. Загальні вимоги до підготовлених твердих M_1 та M_2 , представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Загальні вимоги до твердих M для модифікації ВО

Найменування показника	Одиниці виміру	Числове значення
Вологість, не більше	% мас.	0,5
Розмір часточок, діаметр не більше	мм	4
Термічна стійкість, не менше	°C	200
Небезпечність, не вище	Клас	III-IV

Переробка сировинних компонентів. Технологія виробництва IBM (див. рис. 3), включає в себе три основних стадії: приготування концентрату ($M_1 + M_2 + \Pi$); активація концентрату; компаундування. Так, для приготування концентрату Π (потік I) з резервуару (P-1) за допомогою насосу (H-1) подається до змішувального пристрою (ЗП), куди з бункерів-накопичувачів (БН), що оснащені дозувальними пристроями, за допомогою стрічкового конвеєру (СК) подається M_1 (LDPE) та M_2 (ВАШ). В (ЗП) при температурі 170–180 °С при постійному перемішуванні (швидкість обертання механічного перемішуючого пристрою 300–500 об/хв.) Під час приготування концентрату відбувається процес девулканізації ВАШ.

Приготовлений концентрат (потік II) за допомогою насосу (H-3) надходить до колони окиснення (КО), куди у нижню частину за допомогою компресора (К) через ресивер (РЕ), подається повітря (потік III).

В (КО) при температурі 200–220 °С та 0,12 МПа, відбувається активація концентрату за рахунок процесу термоокислювальної деструкції. Леткі вуглеводневі фракції (потік V), які утворюються під час процесу активації, виходять з верху (КО), проходять апарат повітряного охолодження (АПО) та апарат водяного охолодження (АВО), охолоджуються до 40–50 °С та за допомогою (H-5) виводяться з установки.

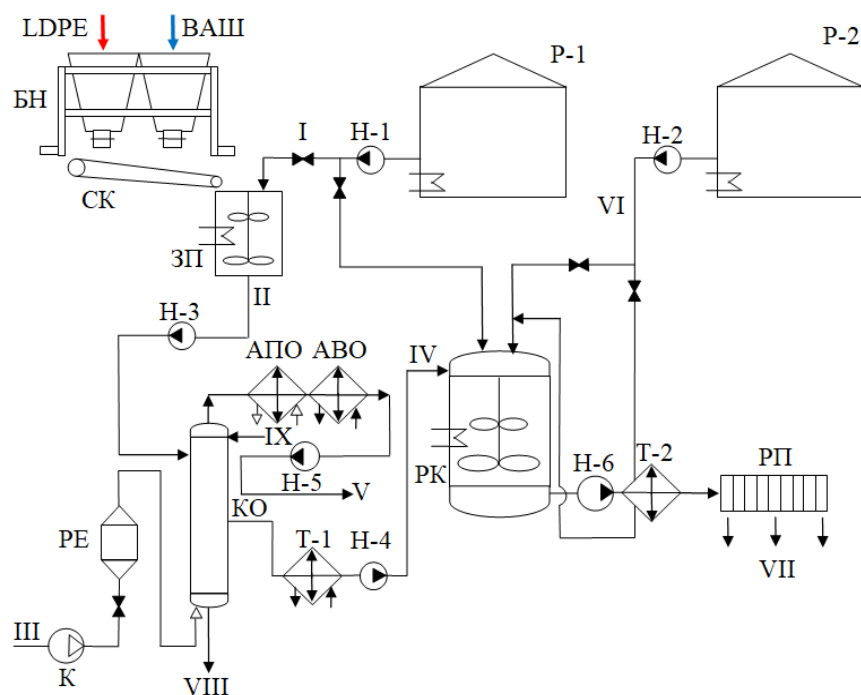


Рисунок 3 – Комбінована принципова схема виробництва IBM

Активованій концентрат (потік IV) за допомогою насосу (H-4) боковим погоном виходить з колони окиснення (КО), проходить теплообмінник (Т-1) та поступає в реактор компаундування (РК). В РК разом з активованим концентратом подається з резервуару (P-2) за допомогою насоса (H-2) підготовлена ВО.

В РК при температурі 150–160 °С відбувається процес компаундування. По закінченню процесу, готовий IBM (потік VII) за допомогою (H-6) прокачуються через теплообмінник (Т-2) та з температурою 60–70 °С надходить до роздавального пристрою (РП), а далі до споживачів.

Таким чином, реалізувавши схему виробництва IBM на базі вторинної сировини, що представлена на рис. 3 можна отримати продукт з характеристиками, наведеними в табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристики отриманих IBM

Найменування показника	Одиниці виміру	Значення показника
Колір	–	Від світло коричневий до чорний
Зовнішній вигляд	–	Однорідна в'язка або тверда маса
Температура розм'якшення (t_p) за методом «Кільця та шару»	°C	75–150
Наявність водорозчинних кислот та лугів	–	Відсутність
Корозійний вплив на метали (сталь)	Клас	1a-1b
Стійкість до статичної дії води при 20 °C, не менше:	Год.	720
Захисні властивості (Сталь 3) при статичній дії речовин при 20 °C, протягом 720 год.: – 10 % водного розчину NaCl; – 3 % водного розчину Na ₂ SO ₃ .		Витримує
Температурні межі використання	°C	-30 ÷ +120
Пенетрація (X_n) при 25°C	мм×10 ⁻¹	10–40
Адгезійні властивості (A_a)	Н/мм ²	0,12–0,65
Еластичність (E)	%	35–60
Водонасичення (X _{H2O}) за 24 години	%	0,02–0,50

Таким чином, отримані IBM за багатьма показниками (наприклад, водонасичення, температури розм'якшення, пенетрації тощо) значно перевищують характеристики ізоляційного бітуму БНІ-IV, який досить часто використовується для ізоляції нафто- та газопроводів, та можуть виступати в якості його замінників.

Висновки

На сьогоднішній день використання захисних покриттів можна вважати одним з найефективніших, порівняно дешевих та універсальних методів пасивного захисту металевих поверхні нафто- та газопроводів від атмосферної та електрохімічної корозії. В якості досить перспективного типу захисного покриття слід розглядати ізоляційні вуглеводневі матеріали (IBM), які поєднують у своєму складі вуглеводневу основу (нафтові залишки – мазут, гудрон; промислові відходи – нафтовий шлам, кислий гудрон), модифікатори (активовані вторинні полімери – LDPE, HDPE, PP та відпрацьовані автомобільні шини), пластифікатор (відпрацьовані змашувальні оливи). Активацію модифікаторів, шляхом обробки киснем повітря, проводять задля поліпшення фізико-хімічної взаємодії між основними компонентами IBM з метою отримання стабільних протягом тривалого часу матеріалів.

Попередню підготовку вуглеводневої основи, що представлена відходами виробництва (кислими гудронами), пропонується проводити за схемою, яка складається з

кип'ятіння вуглеводневої основи у водному середовищі (100 ± 1 °C, у співвідношенні води до сировини 1:1÷1:7), випаровування води (120 ± 1 °C), концентрування сировини (0,11–0,13 МПа, 200–350(380) °C). Результатом такої підготовки є продукт з небезпечністю III-IV класу, вологістю 0,2–0,6 %, вмістом механічних домішок 0,15–0,55, вмістом летких (початок кипіння до 120 °C) вуглеводнів до 3 %, кінематичною в'язкістю при 100 °C до 90 мм²/с та корозійною дією на метал (сталь 3) до класу 1b.

Підготовка модифікаторів (твердих поліолефінів LDPE, HDPE, PP та відпрацьованих автомобільних шин) доцільно здійснювати шляхом поєднання таких технологічних стадій як сортування за видами, подрібнення у дробарках, промивка в ваннах флоатації, просушка шляхом продування крізь подрібнені модифікатор гарячого (100–120 °C) сухого (температура точки роси не менше 30 °C) повітря. Результатом такої підготовки є продукт з термічною стійкістю не менше 200 °C, небезпечністю III-IV класу, вологістю 0,5 %, розміром часточок з діаметром не більше 4 мм.

Запропоновано переробляти підготовлені сировинні компоненти в IBM за схемою, яка включає в себе три основних стадії: приготування концентрату (M1+M2+Π) при 170–180 °C та 300–500 об/хв., активація концентрату (200–220 °C, 0,12 МПа, об'єм повітря 0,0020–0,0025 м³/хв.), компаундування (150–160 °C).

Встановлено, що за рахунок обраної сировини, технологічних методів її підготовки та переробки були отримані нові IBM (межі використання $-30 \div +120$ °C), які за своїми характеристиками (для IBM: $t_p=75-150$ °C, $X_p=10-40$ мм $\times 10^{-1}$, $A_a=0,12-0,65$ Н/мм², $E=35-60$ %, $X_{H_2O}=0,02-0,50$ %; для IBMM: $t_p=35-75$ °C, $A_a=0,11-0,60$ Н/мм², $E=5-30$ %, $X_{H_2O}=0,02-0,50$ %) можуть використовуватися у промисловості замість ізоляційного бітуму БНІ-IV, рідкої гуми IMPERMEABILIZANTE E-88, мастик РБВ-25, РБВ-35, РБВ-50, МБК-Г для захисту нафто- та газопроводів, зокрема прокладених під землею.

Література

1. Ma L., Zhang P., Li W., Liu X., Yue Y., Liu J., Qu H., Cao X., Bian J. Research progress on coating technology for oil and gas pipelines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2025. Vol. 2971. P. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/2971/1/012006.
2. Кизима В. П., Куковський А. Г., Яковчук В. В., та ін. Улаштування захисних покриттів у будівництві : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2018. 241 с.
3. ДСТУ-Н Б А.3.1-29:2015. Магістральні трубопроводи. Нанесення захисних покривів та улаштування теплової ізоляції : настанова. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. 108 с.
4. Білим П. А., Заїченко В. І., Припростий В. О., Нікітченко О. Ю. Розробка захисних полімерних покриттів трубопроводів з електропровідним наповнювачем. *Комунальне господарство міст*. 2019. Т. 6, вип. 152. С. 219–223.
5. Bekbauliyeva A. The current state of pipeline corrosion protection with polymer coatings. *Yessenov Science Journal*. 2024. Vol. 49, No. 4. P. 146–152. DOI: 10.56525/PAKO5631.
6. Петрина Д. Ю., Петрина Л. Г. Вплив корозійного середовища на сучасні сталі магістральних трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2022. № 2(83). С. 95–104.

7. Гаркуша М. В. Застосування гідроізоляційних покриттів для захисту від корозії дорожніх водопропускних труб з металевих гофрованих конструкцій. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10 (41). ч. I. С. 91–101.

8. Aghabarari B., Pourhashem S., Moeinifard B. Investigating the accelerated electrochemical corrosion protection performance of coal-tar and bitumen enamel coating for pipelines. *Boletín del Grupo Español del Carbón*. 2019. Vol. 51. P. 2–4.

9. Никифорчин Г. М., Черватюк В. А., Маруха В. І., Слободян З. В., Кушнір І. М., Стехнович Л. В. Технологія протикорозійного захисту сталевих конструкцій покриттями на основі швидкотвердної бітумно-латексної емульсії. *Nauka innov*. 2016. № 12 (1). С. 32–40.

10. Ткачук М. М., Филипчук В. Л., Якимчук Б. Н., Кириша Р. О. Будівництво зовнішніх мереж і монтаж санітарно-технічного обладнання будівель : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2013. 391 с.

11. Kren A., Machikhin A., Delendik M. Prediction of the residual lifetime of bitumen coatings on urban gas pipelines from the change in their mechanical characteristics during thermal-oxidative aging. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2024. Vol. 212, Part A. P. 105332. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105332>.

12. Florková Z., Sedivy S., Pastorková J. The environmental impact of asphalt mixtures production for road infrastructure. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1015, No. 1. P. 012097. DOI: 10.1088/1757-899X/1015/1/012097.

13. de Bortoli A., Rahimy O., Levasseur A. Environmental life-cycle impacts of bitumen: systematic review and new Canadian models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2024. Vol. 136. P. 104439. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104439>.

14. Гаїпов А. Я., Григоров А. Б. Нові ізоляційні вуглеводневі матеріали для захисту нафто- та газопроводів від корозії. *Вуглехімічний журнал*. 2024. № 5. С. 48–60.

15. Гаїпов А. Я., Григоров А. Б. Технологічні основи виробництва ізоляційних вуглеводневих матеріалів для захисту від корозії нафто- та газопроводів. *Вуглехімічний журнал*. 2024. № 6. С. 41–48.

16. Tchoquessi Diodjo M. R., Joliff Y., Belec L., Aragon E., Perrin F. X. Stress evolution in multilayer polymer coating under thermal and pressure loading applied to the pipeline structure. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2021. Vol. 191. P. 104386. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2021.104386.

17. Leonard S. A., Stegemann J. A., Roy A. Characterization of acid tars. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 175(1–3). P. 382–392.

18. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. 2-ге вид., переробл. та доп. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с.

19. Шльончак І. А., Батраченко О. В. Утилізація автомобільних шин в українській перспективі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10 (41), ч. I. С. 221–227. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.221-227](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.221-227).

Bibliography (transliterated)

1. Ma L., Zhang P., Li W., Liu X., Yue Y., Liu J., Qu H., Cao X., Bian J. Research progress on coating technology for oil and gas pipelines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2025. Vol. 2971. P. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/2971/1/012006.

2. Kyzyma V. P., Kukovskyi A. H., Yakovchuk V. V., ta in. Ulashtuvannia zakhysnykh pokryttiv u budivnytstvi : navch. posib. Rivne : NUVHP, 2018. 241 p.
3. DSTU-N B A.3.1-29:2015. Mahistralni truboprovody. Nanesennia zakhysnykh pokryviv ta ulashtuvannia teplovoi izoliatsii : nastanova. Kyiv.: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, 2016. 108 p.
4. Bilym P. A., Zaichenko V. I., Pryprostyi V. O., Nikitchenko O. Iu. Rozrobka zakhysnykh polimernykh pokryttiv truboprovodiv z elektroprovodnym napovniuvachem. *Komunalne hospodarstvo mist*. 2019. T. 6, vyp. 152. P. 219–223.
5. Bekbauliyeva A. The current state of pipeline corrosion protection with polymer coatings. *Yessenov Science Journal*. 2024. Vol. 49, No. 4. P. 146–152. DOI: 10.56525/PAKO5631.
6. Petryna D. Iu., Petryna L. H. Vplyv koroziiinoho seredovyshcha na suchasni stali mahistralnykh truboprovodiv. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch*. 2022. No. 2 (83). P. 95–104.
7. Harkusha M. V. Zastosuvannia hidroizoliatsiinykh pokryttiv dlia zakhystu vid korozii dorozhnykh vodopropusknykh trub z metalevykh hofrovanykh konstruksii. Tsentralno-ukrainskyi naukovyi visnyk. *Tekhnichni nauky*. 2024. Vyp. 10(41). ch. I. P. 91–101.
8. Aghabarari B., Pourhashem S., Moeinifard B. Investigating the accelerated electrochemical corrosion protection performance of coal-tar and bitumen enamel coating for pipelines. *Boletín del Grupo Español del Carbón*. 2019. Vol. 51. P. 2–4.
9. Nykyforchyn H. M., Chervatiuk V. A., Marukha V. I., Slobodian Z. V., Kushnir I. M., Stekhnovych L. V. Tekhnolohiia protykoroziiinoho zakhystu stalevykh konstruksii pokryttia-my na osnovi shvydkotverdnoid bitumno-lateksnoi emulsii. *Nauka innov*. 2016. No. 12 (1). P. 32–40.
10. Tkachuk M. M., Fylypchuk V. L., Yakymchuk B. N., Kyrysha R. O. Budivnytstvo zovnishnykh merezh i montazh sanitarno-tekhnichnoho obladnannia budivel : navch. posib. Rivne : NUVHP, 2013. 391 p.
11. Kren A., Machikhin A., Delendik M. Prediction of the residual lifetime of bitumen coatings on urban gas pipelines from the change in their mechanical characteristics during thermal-oxidative aging. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2024. Vol. 212, Part A. P. 105332. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105332>.
12. Florková Z., Sedivy S., Pastorková J. The environmental impact of asphalt mixtures production for road infrastructure. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1015, No. 1. P. 012097. DOI: 10.1088/1757-899X/1015/1/012097.
13. de Bortoli A., Rahimy O., Levasseur A. Environmental life-cycle impacts of bitumen: systematic review and new Canadian models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2024. Vol. 136. P. 104439. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104439>.
14. Haipov A. Ia., Hryhorov A. B. Novi izoliatsiini vuhlevodnevi materialy dlia zakhystu nafto- ta hazoprovodiv vid korozii. *Vuhlekhimichniy zhurnal*. 2024. No. 5. P. 48–60.
15. Haipov A. Ia., Hryhorov A. B. Tekhnolohichni osnovy vyrobnytstva izoliatsiinykh vuhlevodnykh materialiv dlia zakhystu vid korozii nafto- ta hazoprovodiv. *Vuhlekhimichniy zhurnal*. 2024. No. 6. P. 41–48.

16. Tchoquessi Diodjo M. R., Joliff Y., Belec L., Aragon E., Perrin F. X. Stress evolution in multilayer polymer coating under thermal and pressure loading applied to the pipeline structure. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2021. Vol. 191. P. 104386. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2021.104386.

17. Leonard S. A., Stegemann J. A., Roy A. Characterization of acid tars // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 175(1–3). P. 382–392.

18. Mikulonok I. O. Tekhnolohichni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv : navch. posib. 2-he vyd., pererobl. ta dop. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. 292 p.

19. Shlonchak I. A., Batrachenko O. V. Utylizatsiia avtomobilnykh shyn v ukrainskii perspektyvi. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*. 2024. Vyp. 10 (41), ch. I. P. 221–227. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.221-227](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.221-227).

УДК 622.692.4.076

А. Я. Гаїпов, А. Б. Григоров

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА НА БАЗІ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ ІЗОЛЯЦІЙНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ НАФТО- ТА ГАЗОПРОВІДІВ

В статті проаналізовані сучасні способи пасивного захисту металевої поверхні нафто- та газопроводів від атмосферної та електрохімічної корозії. Визначено основні недоліки, які виникають при експлуатації таких типів покриттів як полімерні, металеві та бітумні. Запропоновано використання альтернативного типу покриття – ізоляційних вуглеводневих матеріалів (ІВМ), яке дозволить частково позбутися недоліків класичних покриттів, а саме: знизити вартість та спростити технологію виробництва; спростити процедуру ремонту покриттів у польових умовах; розширити температурний діапазон використання покриттів; забезпечити можливість армування скловолокном, геотекстилем; сприяти утилізації шкідливих та небезпечних відходів виробництва та споживання. Означені ІВМ, представляють собою композиційну систему, яка поєднує у своєму складі вуглеводневу основу (нафтові залишки – мазут, гудрон; промислові відходи – нафтовий шлам, кислий гудрон), модифікатори (активовані вторинні полімери – LDPE, HDPE, PP та відпрацьовані автомобільні шини), пластифікатор (відпрацьовані змащувальні оливи).

Загальна схема виробництва ІВМ складається з блоку підготовки сировинних компонентів та блоку їх технологічної переробки. В блоку підготовки реалізуються наступні технологічні операції: для вуглеводневої основи – нейтралізація, промивка водою, зневоднення та концентрування; для модифікаторів – промивка, просушка, подрібнення та активація; для пластифікатора – видалення води та механічних домішок. В блоку переробки сировинних компонентів відбувається приготування концентрату (суміш модифікаторів та пластифікатору) при 170–180 °С та 300–500 об/хв., активація концентрату (температура – 200–220 °С, тиск – 0,12 МПа, об'єм повітря, що продувається – 0,0020–0,0025 м³/хв.), компаундування (температура – 150–160 °С).

Реалізувавши запропоновану технологічну схему переробки сировинних компонентів були отримані нові ІВМ (межі використання -30 ÷ +120°C), які за своїми харак-

теристиками можуть використовуватися у промисловості замість ізоляційного бітуму БНІ-ІV, рідкої гуми IMPERMEABILIZANTE E-88, мастик РБВ-25, РБВ-35, РБВ-50, МБК-Г для захисту нафто- та газопроводів від різних видів корозійного руйнування.

Ключові слова: захисні покриття, ізоляційні вуглеводневі матеріали, корозія, вторинна сировина, підготовка, переробка, кислий гудрон, полімери, відпрацьовані оливи, властивості.

A. Gaipov, A. Hryhorov

PRODUCTION TECHNOLOGY BASED ON SECONDARY RAW MATERIALS OF INSULATING HYDROCARBON MATERIALS FOR PROTECTION OF OIL AND GAS PIPES

The article analyzes modern methods of passive protection of the metal surface of oil and gas pipelines from atmospheric and electrochemical corrosion. The main disadvantages that arise during the operation of such types of coatings as polymer, metal and bitumen are identified. The use of an alternative type of coating is proposed – insulating hydrocarbon materials (IHM), which will partially eliminate the disadvantages of classic coatings, namely: reduce the cost and simplify the production technology; simplify the procedure for repairing coatings in the field; expand the temperature range of use of coatings; provide the possibility of reinforcing with fiberglass, geotextiles; promote the disposal of harmful and hazardous waste from production and consumption. The specified IHMs are a composite system that combines a hydrocarbon base (oil residues – fuel oil, tar; industrial waste – oil sludge, acid tar), modifiers (activated secondary polymers – LDPE, HDPE, PP and used car tires), plasticizer (used lubricating oils).

The general scheme of IHM production consists of a raw material preparation unit and a technological processing unit. The following technological operations are implemented in the preparation unit: for the hydrocarbon base – neutralization, washing with water, dehydration and concentration; for – modifiers – washing, drying, grinding and activation; for the plasticizer – removal of water and mechanical impurities. In the raw material processing unit, the concentrate (mixture of modifiers and plasticizer) is prepared at 170–180 °C and 300–500 rpm, concentrate activation (temperature – 200–220 °C, pressure – 0.12 MPa, volume of blown air – 0.0020–0.0025 m³/min), compounding (temperature – 150–160 °C).

By implementing the proposed technological scheme for processing raw components, new IHMs were obtained (limits of use -30 ÷ +120 °C), which, according to their characteristics, can be used in industry instead of insulating bitumen БНІ-ІV, liquid rubber IMPERMEABILIZANTE E-88, mastics RBV-25, RBV-35, RBV-50, MBK-G to protect oil and gas pipelines from various types of corrosive destruction.

Keywords: protective coatings, insulating hydrocarbon materials, corrosion, secondary raw materials, preparation, processing, acid tar, polymers, waste oils, properties.

М. С. Кочетов, аспірант, Т. С. Тихомирова, канд. техн. наук, доцент

ВИКОРИСТАННЯ КАВОВОЇ ГУЩІ У СКЛАДІ ОЧИЩУЮЧИХ ЗАСОБІВ ЯК ЕЛЕМЕНТ СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: кавава гуща, відходи, крафтове мило, очищуюча здатність, сталий розвиток, поводження з відходами.

Вступ. Щорічне споживання кави зростає в усьому світі, й Україна не є виключенням. Одним з факторів поширення кави як напою по всьому світу є глобалізація та скорочення термінів доставки каваової сировини з місця її традиційного вирощування до споживачів напою у всьому світі.

Каваовий бізнес в Україні можна умовно поділити на три великих групи:

- 1 група – виготовлення розчинної кави;
- 2 група – обсмаження кави та її подрібнення з метою подальшої реалізації;
- 3 група – кав'ярні, в тому числі унікальні (крафтові) та мережеві.

Поштовхом до активного розвитку підприємств другої та третьої групи в Україні став період нульової митної ставки на ввезення зеленого каваового зерна з ЄС у 2016–2020 рр. Далі ввезене зелене зерно обсмажувалось на території України та в подальшому реалізовувалась готова продукція з доданою вартістю як в Україні – дешевше за імпортні аналоги, так й за її межами.

Повномасштабне вторгнення 24.02.2022 року з одного боку, призвело до масового закриття крафтових та мережевих кав'ярень у першій половині 2022 року, особливо в зоні активних бойових дій, на тимчасово окупованих територіях, а з іншого боку – появи нового типу кав'ярень у вигляді ветеранського бізнесу. Зазначимо також, що кав'ярні є тим елементом роздрібної торгівлі, який найшвидше відновлює свою роботу після деокупації [1].

Під час обсмаження зелених каваових зерен утворюються тверді, сухі, леткі органічні відходи у вигляді каваового лушпиння, так звана *silver skin*. Під час споживання кави утворюється інший тип органічних відходів – кавава гуща, яка має високу вологість. Обидва типи відходів можуть утворюватися у кожній групі підприємств каваового бізнесу – існують мережеві та крафтові кав'ярні, які самостійно обсмажують зелені каваові зерна. При приготуванні у кава-машині порції каваового напою об'ємом 50 мл згідно рецептури закладається 18 грам сухої меленої кави, що призводить до утворення 35 грам каваової гущі як відходу. Тобто головним типом відходів, які утворюються у кав'ярнях та закладах HoReCa, де подають каваові напої, є кавава гуща з вологістю 80–95 мас.%, яка за відсутності сталих практик поводження з нею підлягає захороненню на полігоні разом з іншими харчовими відходами, які утворились у закладі.

Сталі практики поводження з відходами будь-якого типу передбачають їх вторинне використання, що також відповідає національній ієрархії поводження з відходами [2]. Серед основних напрямків використання каваової гущі, які реалізуються в Україні можна виділити наступні:

1) у сільському господарстві в якості добрив [3] та модифікаторів фізико-механічних властивостей ґрунтів [4]; однозначні висновки щодо доцільності такого використання відсутні;

2) при виробництві нових полімерних композиційних матеріалів, здатних до біорозкладання, в якості модифікуючої доданки [5–7]; перспективний напрямок при створенні здатного до біорозкладання пакувального матеріалу, який є альтернативою традиційним полімерним матеріалам;

3) для виробництва паливних елементів [8] або отримання біогазу [9];

4) для отримання харчових волокон [10]; новий підхід до використання кавової гущі який може підвищувати харчову цінність продуктів харчування;

5) у косметичній промисловості як абразивний матеріал.

У сучасній вітчизняній науковій літературі відсутні ґрунтовні дослідження властивостей очищаючих засобів різного призначення, які містять кавову гущу. Наявні публікації мають оглядовий характер [11] та не зосереджені на визначенні комплексу властивостей очищувальних засобів залежно від типу основи, вмісту кавової гущі, розміру часток, типу забруднень.

Метою цієї роботи є дослідження очищувальної здатності мила, що містить різну кількість кавової гущі як абразивного наповнювача, у зв'язку з різними типами забруднювачів, а також проаналізувати запропонований процес обробки кавової гущі з точки зору концепції сталого розвитку.

Матеріали та методика досліджень. У роботі використовувалися мильні основи різного типу (табл. 1) та кавова гуща, зібрана в кав'ярнях Києва й висушена до вмісту води 10 мас. % (табл. 2).

Таблиця 1 – Характеристика мильних основ

Зразок мильної основи	Тип	Характеристика
МО-1	гліцерінова прозора	стійке піноутворення, дозволяє зробити прозорі естетично привабливі композиції
МО-2	пальмова мильна основа, не прозора	містить насичені жирні кислоти
МО-3	локосова мильна основа, не прозора	містить лаурінову кислоту

Таблиця 2 – Характеристика кавової гущі

Зразок кавової гущі	Місце утворення	Розмір часток, мкм	Колір	Інтенсивність запаху кави
ВКГ-1	еспресо-кавомашина	60–120	темно-коричневий	сильний
ВКГ-2	ручні способи заварювання	400–600	коричневий	помірний
ВКГ-3	фільтр-кавомашина	800–900	світло-коричневий	слабкий
ВКГ-4	суміш кавової гущі, утвореної у закладі	60-900	сірий	помірний

Вміст води визначали гравіметричним методом, згідно загальноприйнятій методики [12]. Кавову гущу вводили у рідку мильну основу, попередньо розтоплену у мікрохвильовому полі у визначеній кількості та ретельно перемішували впродовж 2

хвилин, після чого зразки заливались у форми висотою 3 см та охолоджувались у приміщенні за температури +20 °С впродовж 5 годин.

В якості контрольних зразків використовували рідке дитяче мило ТМ Honey Bunny, рідке мило ТМ Origami Ногеса, автомобільну пасту для очищення стійких забруднень виробництва НВФ «Сімокс». Вологість шкіри визначали експрес методом за допомогою портативного аналізатору вологості та жирності шкіри ТМ DYM003. Для оцінки очищаючої здатності мила було розроблено власну бальну шкалу (табл. 3). Досліджувалися забруднення долонь рук у дорослих та дітей.

Таблиця 3 – Шкала оцінки очищаючої здатності мила

Умова зникнення забруднення	Оцінка, бал
Повністю зникає через 1 хвилину в холодній воді	10
Повністю зникає через 1 хвилину в гарячій воді	9
Повністю зникає через 3 хвилини в холодній воді	8
Повністю зникає через 3 хвилини в гарячій воді	7
Повністю зникає через після багаторазового (2+) намилювання в холодній воді	6
Повністю зникає через після багаторазового (2+) намилювання в гарячій воді	5
Зникає 50% забруднення через 3 хвилини в холодній воді	4
Зникає 50% забруднення через 3 хвилини в гарячій воді	3
Зникає не більше 20% забруднення через 3 хвилини в холодній воді	2
Зникає не більше 20% забруднення через 3 хвилини в гарячій воді	1

Обговорення результатів. Образ та спосіб життя людини, стать та вік визначають найрозповсюдженіші типи забруднень рук, які складно видаляються звичайними засобами (рис. 1). Всього було опитано 350 респондентів, дані щодо забруднень долонь дітей записані у присутності батьків або опікунів дітей. Так, наприклад, для дітей складними для видалення типами забруднення долонь є фломастер та кулькова ручка – у 26 % та 17 % випадків відповідно (рис. 1а), тоді як для жінок – ґрунтово-трав'яна суміш (18 % випадків) та залишки косметичних засобів (16 % випадків) (рис. 1б), для чоловіків – паливно-мастильні матеріали (32 % випадків) та ґрунтово-трав'яна суміш (26 % випадків) (рис. 1в).

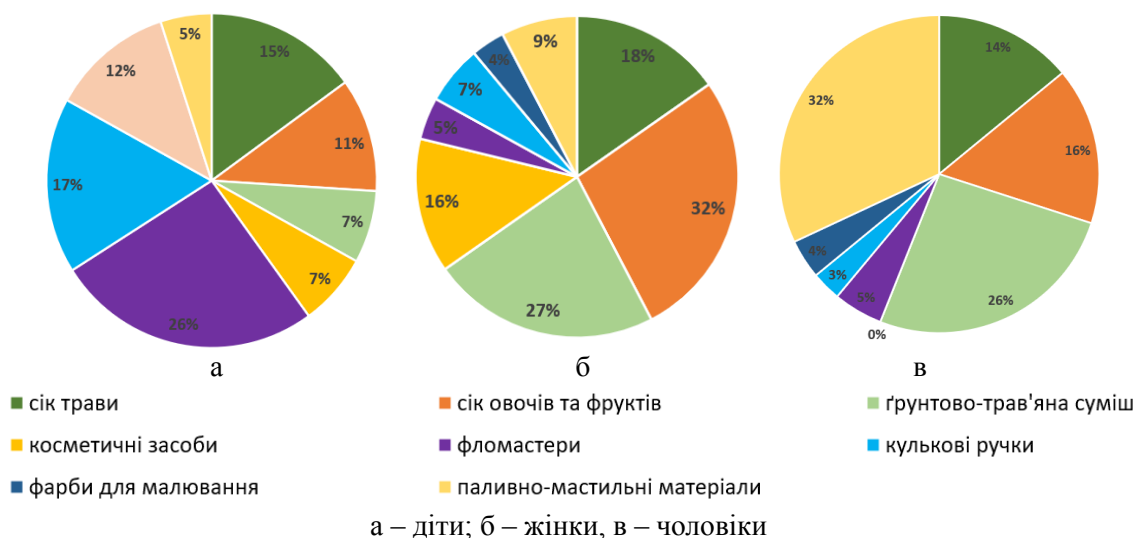


Рисунок 1 – Результати опитування щодо переважаючих типів забруднень рук

Крафтове мило виготовляється у невеличких майстернях без використання промислового обладнання, переважно ручним способом. Залежно від вмісту кавової гущі у мильній основі суттєво відрізняється не тільки очищаюча здатність виготовленого мила, а й технологічні властивості продукту. Практично неможливо рівномірно ввести кавову гущу будь якого типу у мильні основи у кількості понад 25 мас.% (табл. 4), що пов'язано з неможливістю якісного переміщення інгредієнтів через високу в'язкість отриманої суміші.

Таблиця 4 – Характеристики композицій мила з різним вмістом відходів споживання кави

Мильна основа	Вміст ВКГ-4, мас. %	Характеристики композицій		Очищаюча здатність по відношенню до, бал	
		рівномірність розподілу ВКГ	наявність агломератів ВКГ	кулькової ручки	сік трави
МО-1	10	нерівномірно, осідання в нижній шар 70 % ВКГ	відсутні	5	4
	25	рівномірно по всій товщині		9	10
	35	нерівномірно	5–7 агломератів	7	7
МО-2	10	нерівномірно, осідання в нижній шар 60 % ВКГ	відсутні	5	4
	25	рівномірно по всій товщині		9	9
	35	нерівномірно	7–9 агломератів	6	7
МО-3	10	нерівномірно, осідання в нижній шар 50 % ВКГ	відсутні	5	4
	25	рівномірно по всій товщині		9	9
	35	нерівномірно	5–8 агломератів	7	6

При спробах ввести ВКГ у кількості 35 мас.% та більше спостерігається явище утворення агломератів кавової гущі, які залишаються без просочування мильною основою (рис. 2а). Введення ВКГ у кількості 10 мас.% призводить до нерівномірного розподілу кавової гущі по всій товщині мила, до 70 % ВКГ осідає у нижній шар завтовшки 0,5–1 см (рис. 2б). Для подальших досліджень очищаючої здатності мила з кавовою гущею було обрано композиції з вмістом ВКГ 25 мас.%



а



б

а – вміст ВКГ-4 = 35 мас.%; б – вміст ВКГ-4 = 10 мас. %

Рисунок 2 – Композиції мила на гліцериновій основі з різним вмістом кавової гущі

Результати досліджень показують, що розмір часток ВКГ не суттєво впливає на очищаючу здатність мильних композицій по відношенню до різних типів забруднень (табл. 5). Мило, яке містить кавову гущу з розміром часток 60–120 мкм краще очищає

так звані хімічні забруднення типу фломастер та кулькова ручка, тоді як мило, яке містить кавову гущу з розміром часток 400–600 мкм, 800–900 мкм краще очищає забруднення паливно-мастильними матеріалами (табл. 5). У порівнянні з традиційними типами мила всі композиції, як містять кавову гущу, володіють кращою очищаючою здатністю.

Таблиця 5 – Очищаюча здатність мильних композицій

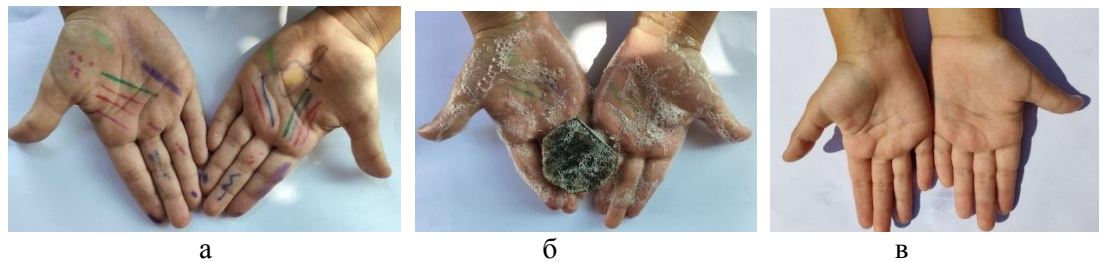
Композиція	Очищаюча здатність по відношенню до забруднення, бал						Середня оцінка, бал	Вологість шкіри після використання %
	Сік		Ф ¹	КР ²	КЗ ³	ПММ ⁴		
	трави	овочів						
МО-1+ВКГ-1	10	10	9	8	8	7	8,67	58 ⁵
МО-1+ВКГ-2	9	9	8	9	8	9	8,67	
МО-1+ВКГ-3	9	9	8	9	10	10	9,16	
МО-1+ВКГ-4	10	9	10	10	9	9	9,50	
МО-2+ВКГ-1	10	10	9	8	7	8	8,67	63
МО-2+ВКГ-2	9	9	8	9	9	8	8,67	
МО-2+ВКГ-3	9	9	8	9	10	10	9,16	
МО-2+ВКГ-4	9	9	10	10	10	9	9,50	
МО-3+ВКГ-1	10	9	9	8	8	8	8,67	65
МО-3+ВКГ-2	9	8	8	9	8	10	8,67	
МО-3+ВКГ-3	8	9	8	10	10	10	9,16	
МО-3+ВКГ-4	9	10	10	10	9	10	9,67	
Дитяче мило	5	5	3	5	6	3	4,50	47
Рідке мило	4	5	4	4	5	2	4,00	38
Автомобільна паста	8	8	7	7	10	10	8,33	32

Примітки: 1 – фломастер; 2 – кулькова ручка; 3 – косметичні засоби; 4 – паливно-мастильні матеріали; початкова вологість шкіри долонь (верхній епідерміс) становила 60 %.

Перевага використання запропонованих композицій мила з ВКГ особливо помітна для складних забруднень дитячих долонь типу фломастер – очищаюча здатність перевищує дитяче мило на 6–7 балів, в залежності від типу мильної основи (рис. 3). Перевага мила з кавовою гущею для очистки соків овочів та трави становить 4–5 балів у порівнянні з рідким та дитячим милом.

Середня оцінка очищаючої здатності композицій мила з кавовою гущею знаходиться в діапазоні від 8,67 до 9,50 на противагу звичайному дитячому та рідкому мила, середня оцінка очищаючою здатності яких не перевищує 4,50 балів. Розмір часток кавової гущі впливає на очищаючу здатність мила наступним чином: чим менший розмір часток, тим краще очищаються забруднення природнього походження – сік трави та овочів, а також хімічних забруднень типу фломастер й кулькова ручка – для композицій МО-1+ВКГ-1, МО-2+ВКГ-1, МО-3+ВКГ-1 оцінка очищаючої здатності становить

9–10 балів для вказаних забруднювачів; чим більший розмір часток ВКГ, тим краще очищаються забруднення типу паливно-мастильні матеріали та косметичні засоби – для композицій МО-1+ВКГ-3, МО-2+ВКГ-3, МО-3+ВКГ-3 оцінка очищаючої здатності становить 9-10 балів для вказаних забруднювачів. У кав'ярнях різного типу при запровадженні роздільного від інших типів відходів, збору кавової гущі, найчастіше вона збирається в одну ємність, внаслідок чого утворюється відходи типу ВКГ-4, який продемонстрував оптимальну очищаючу здатність по відношенню до всіх складних типів забруднень та може бути рекомендований для виготовлення крафтового мила. Наприклад, композиція з ВКГ-4 на гліцериновій мильній основі має середню оцінку очищаючої здатності 9,50, а на кокосовій мильній основі – 9,67 (табл. 5).



а – забруднені фломастером долоні дитячих рук; б – використання мильної композиції МО-1+ВКГ-4 для очищення; в – результат очистки композицією МО-1+ВКГ-4, оцінка 10 балів.
Рисунок 3 – Очищаюча здатність мила з кавовою гущею

Окрім очищаючою здатності важливою гігієнічною та споживчою характеристикою мила є його вплив на вологість шкіри. Надмірне систематичне падіння вологості шкіри призводить до втрати нею бар'єрних функцій та передчасного старіння [13]. Автомобільна паста, яка демонструє високу очищаючу здатність по відношенню до паливно-мастильних матеріалів, а також соку трави та овочів (табл. 5), дуже сильно знижує вологість шкіри верхнього шару шкіри – майже вдвічі після її використання. Натомість, використання крафтового мила з додаванням ВКГ не зменшує вологість шкіри та навіть трішки підвищує її рівень завдяки компонентам мильної основи (табл. 5). Використання рідкого мила також призводить до зниження вологості шкіри на 22 % від початкової, що є суттєвим зниженням; дитяче мило знижує вологість шкіри на 13 %. Особливо небезпечним зниження вологості шкіри може бути для дітей, оскільки вони частіше бруднять та миють руки та їх шкіра більш чутлива, ніж у дорослих.

Висновки. Використання кавової гущі у складі мила як якості абразивного матеріалу, який дозволяє ефективно видаляти складні забруднення різного походження, є реалізацією сталого підходу до поводження з таким типом відходу. У даному дослідженні доведена ефективність використання кавової гущі у складі крафтового мила з точки зору очищаючої здатності отриманих композицій та збереження вологості шкіри, в тому числі шкіри дитячих долонь.

Реалізація крафтового мила з додаванням кавової гущі або використання в якості подарунку до замовлення, або використання у гігієнічних кімнатах безпосередньо у кав'ярнях, де кавова гуща збиралась, може стати інструментом привернення уваги до бренду кав'ярні, позиціонування кав'ярні як такою, що просуває та підтримує сталі практики, прихованим SMM інструментом та інформаційним приводом. Проведення майстер-класів по виготовленню мила з додаванням кавової гущі для дітей може стати додатковим інструментом не тільки екологічного виховання, а й формуванню сприй-

няття сталих практик поводження з відходами як основну філософію родин. Поширення інформації про ефективність мильних композицій з додаванням кавової гущі може сприяти формуванню екологічної свідомості у широких верст населення.

Література

1. Тихомирова Т. С., Шестопапов О. В., Разно М. Р., Кочетов М. С. Дослідження впливу складу компосту на його здатність покращувати якість ґрунтів. *Аграрні інновації*. 2024. № 25. С. 72–78. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/81879>.
2. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2020 № 2320-IX (станом на 15 лист. 2024 р.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (дата звернення: 05.07.2025).
3. Маліченко В. В. Аналіз сучасного досвіду використання відходів кави в Україні. *Молодь: наука та інновації* : матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, 22–24 листопада 2023 р. Дніпро : НТУ «ДП», 2023. Т. 1. С. 303–304.
4. Тихомирова Т. С., Кочетов М. С. Дослідження впливу відходів обсмаження та споживання кави на якість ґрунтів. *Аграрні інновації*. 2025. № 29. С. 155–161. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/88924>.
5. Лебедев В. В., Мірошніченко Д. В., Тихомирова Т. С., Савченко Д. В., Мазченко М. В., Мисяк В. Р., Кочетов М. С., Соловей Л. В. Дослідження гібридних екологічно безпечних біодеградабельних композитів на основі полілактиду, кавової гущі та гумінових речовин. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2022. № 4. С. 46–54.
6. Waisarikit A., Suadaung N., Khantho B., Hadad B., Ross G. M., Topham P. D., Ross S., Mahasaranon S. Extracted Spent Coffee Grounds as a Performance-Enhancing Additive for Poly(Lactic Acid) Biodegradable Nursery Bags in Agriculture. *Polymers*. 2025. No. 17(5). DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17050561>.
7. Janowski G., Frącz W., Bąk Ł., Sikora J. W., Tomczyk A., Mrówka-Nowotnik G., Mossety-Leszczak B. Effect of Coffee Grounds Content on Properties of PHBV Biocomposites Compared to Similar Composites with Other Fillers. *Polymers*. 2025. No. 17 (6). DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17060764>.
8. Перетяга С. М., Осадчук П. І. Пелети із відходів харчових виробництв. *Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки*. 2018. С. 84–92.
9. Віляда А. Дослідження характеристик відходів кави, що утворюються в закладах громадського харчування. *Збірник праць молодих науковців ЦНТУ*. 2024. Вип. 14. С. 64–66.
10. Сукманов В. О., Комар О. М., Сукманов О. В., Юдіна Т. І. Потенціал використання кавової гущі у технологіях функціональних продуктів харчування. Огляд. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024. № 32 (3). С. 605–648.
11. Буй Л. М., Іщенко Т. І., Шидловська О. Б. Перспективи використання кавової сировини у сфері гостинності. *Інноваційні технології в готельно-ресторанному бізнесі* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., 22–23 березня 2017 р. Київ : НУХТ, 2017. С. 112–114.
12. Вироби кондитерські. Методи визначення масової частки вологи та сухих речовин : ДСТУ 4910:2008. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 15 с.

13. Біохімія шкіри та її придатків : навч. посіб. для студентів 3 курсу спец. 226 «Фармація, промислова фармація» / К. В. Александрова та ін. Запоріжжя : ЗДМУ, 2021. 96 с.

Bibliography (transliterated)

1. Tykhomyrova T. S., Shestopalov O. V., Razno M. R., Kochetov M. S. Doslidzhennia vplyvu skladu kompostu na yoho zdatsnist pokrashchuvaty yakist gruntiv. *Ahrarni innovatsii*. 2024. No. 25. P. 72–78. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/81879>.

2. Pro upravlinnia vidkhodamy : Zakon Ukrainy vid 20.06.2020 № 2320-IX (stanom na 15 lyst. 2024 r.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (data zvernennia: 05.07.2025).

3. Malichenko V. V. Analiz suchasnoho dosvidu vykorystannia vidkhodiv kavy v Ukraini. *Molod: nauka ta innovatsii* : materialy XI Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh, 22–24 lystopada 2023 r. Dnipro : NTU «DP», 2023. Vol. 1. P. 303–304.

4. Tykhomyrova T. S., Kochetov M. S. Doslidzhennia vplyvu vidkhodiv obsmazhennia ta spozhyvannia kavy na yakist gruntiv. *Ahrarni innovatsii*. 2025. No. 29. P. 155–161. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/88924>.

5. Lebediev V. V., Miroshnychenko D. V., Tykhomyrova T. S., Savchenko D. V., Mazchenko M. V., Mysiak V. R., Kochetov M. S., Solovei L. V. Doslidzhennia hibrydnykh ekolohichno bezpechnykh biodehradabelnykh kompozytiv na osnovi polilaktydu, kavovoi hushchi ta huminovykh rehovyn. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozbezrezhennia*. 2022. No. 4. P. 46–54.

6. Waisarikit A., Suadaung N., Khantho B., Hadad B., Ross G. M., Topham P. D., Ross S., Mahasaranon S. Extracted Spent Coffee Grounds as a Performance-Enhancing Additive for Poly(Lactic Acid) Biodegradable Nursery Bags in Agriculture. *Polymers*. 2025. No. 17(5). DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17050561>.

7. Janowski G., Frącz W., Bąk Ł., Sikora J. W., Tomczyk A., Mrówka-Nowotnik G., Mossety-Leszczak B. Effect of Coffee Grounds Content on Properties of PHBV Biocomposites Compared to Similar Composites with Other Fillers. *Polymers*. 2025. No. 17(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17060764>.

8. Peretiaha S. M., Osadchuk P. I. Pelety iz vidkhodiv kharchovykh vyrobnytstv. *Ahrarnyi visnyk Prychornomoria. Tekhnichni nauky*. 2018. P. 84–92.

9. Viliada A. Doslidzhennia kharakterystyk vidkhodiv kavy, shcho utvoriuiutsia v zakladakh hromadskoho kharchuvannia. *Zbirnyk prats molodykh naukovtsiv TsNTU*. 2024. Vyp. 14. P. 64–66.

10. Sukmanov V. O., Komar O. M., Sukmanov O. V., Yudina T. I. Potentsial vykorystannia kavovoi hushchi u tekhnolohiiakh funktsionalnykh produktiv kharchuvannia. Ohliad. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024. No. 32 (3). P. 605–648.

11. Bui L. M., Ishchenko T. I., Shydlovska O. B. Perspektyvy vykorystannia kavovoi syrovyny u sferi hostynnosti. *Innovatsiini tekhnolohii v hotelno-restorannomu biznesi* : materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf., 22–23 bereznia 2017 r. Kyiv : NUKhT, 2017. P. 112–114.

12. Vyroby kondyterski. Metody vyznachennia masovoi chastky volohy ta sukhykh rehovyn : DSTU 4910:2008. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2009. 15 p.

13. Biokhimiia shkiry ta yii prydatkiv : navch. posib. dlia studentiv 3 kursu spets. 226 «Farmatsiia, promyslova farmatsiia» / K. V. Aleksandrova ta in. Zaporizhzhia : ZDMU, 2021. 96 p.

УДК 628.477+664:658.5

М. С. Кочетов, аспірант, Т. С. Тихомирова, канд. техн. наук, доцент

ВИКОРИСТАННЯ КАВОВОЇ ГУЩІ У СКЛАДІ ОЧИЩУЮЧИХ ЗАСОБІВ ЯК ЕЛЕМЕНТ СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ

Розвиток кавового бізнесу, в тому числі активний розвиток кав'ярень різного типу, призвело до збільшення обсягів утворення відходів споживання кави – кавової гущі. Цей тип відходів відноситься до органічних відходів та без запровадження роздільного збору потрапляє на полігони твердих побутових відходів. Проте кавова гуща є цінним ресурсом та може бути використана у сільському господарстві, як енергетичний елемент, в якості доданки у складі полімерних композицій, особливо здатних до біорозкладання, в якості харчових волокон та косметичні галузі. Стале поводження з відходами передбачає їх вторинне використання замість захоронення чи спалювання.

Активний розвиток ринку крафтового мила в Україні спонукає виробників до пошуку унікальних рецептур, які будуть мати переважаючі споживчі властивості без підвищення вартості товару. З огляду на вище перелічене додавання кавової гущі до складу мильних композицій є перспективним методом поводження з цим відходом та відкриває перспективи колоборації між кав'ярнями та виробниками мила з метою реалізації сталого підходу у бізнесі.

Метою даної роботи є дослідити очищаючу здатність мила, яке містить різну кількість кавової гущі в якості абразивного наповнювача, по відношенню до різних типів забруднювачів, а також охарактеризувати запропонований процес поводження з кавовою гущею з точки зору концепції сталого розвитку.

У роботі проведено аналіз впливу розміру часток кавової гущі на очищаючу здатність мильних композицій. Визначено, що чим менший розмір часток, тим краще очищаються забруднення природнього походження – сік трави та овочів, а також хімічних забруднень типу фломастер й кулькова ручка; чим більший розмір часток кавової гущі, тим краще очищаються забруднення типу паливно-мастильні матеріали та косметичні засоби.

Проведені дослідження показали, що мильні композиції з додавання кавової гущі не призводять до різкого падіння вологості шкіри, що характерно для зразків звичайного рідкого мила та автомобільної пасти.

У роботі запропоновано реалізація та використання крафтового мила з додаванням кавової гущі безпосередньо у кав'ярнях, де кавова гуща збиралась, як маркетинговий інструмент привернення уваги, так й як елемент реалізації сталих практик кав'ярнею з одночасною інформаційною складовою для населення.

Ключові слова: кавова гуща, відходи, крафтове мило, очищуюча здатність, сталий розвиток, поводження з відходами.

M. S. Kochetov, T. S. Tykhomyrova

COFFEE GROUNDS USING IN SOAP AS AN ELEMENT OF SUSTAINABLE WASTE MANAGEMENT

The coffee business development, including the active various types coffee shops development, has led to an increase in the coffee consumption waste volume - coffee grounds. This waste is organic waste and, without the separate collection introduction, ends up in solid waste landfills. However, coffee grounds are a valuable resource and can be used in agriculture, as an energy element, as an additive in polymer compositions, especially biodegradable ones, as food fibers, and in the cosmetic industry. Sustainable waste management involves their secondary use instead of landfilling or burning.

The active craft soap market development in Ukraine encourages manufacturers to search for unique recipes that will have superior consumer properties without increasing the product` cost. Given the above, adding coffee grounds to soap compositions is a promising method for waste management and opens up prospects for collaboration between coffee shops and soap manufacturers in order to implement a sustainable approach in business.

The aim of this work is to investigate the soap cleaning ability, which contains different amounts of coffee grounds as an abrasive filler, in relation to different pollutants, and also to characterize the proposed process coffee grounds management based on the sustainable development concept.

The work analyzed the impact of the coffee grounds particle size on the cleaning ability for soap compositions. It was determined that the smaller the particle size, the better the pollution of natural origin is cleaned - grass and vegetable juice, as well as chemical pollution such as a felt-tip pen and ballpoint pen; the larger the size of coffee grounds particles, the better the pollution of fuel and lubricants, and cosmetics is cleaned.

The conducted studies showed that soap compositions with the addition of coffee grounds do not decrease the skin moisture level, which is typical for samples of ordinary liquid soap and car paste.

The work proposes the implementation and craft soap use with the addition of coffee grounds directly in coffee shops, where coffee grounds were collected, as a marketing tool to attract attention, as well as an element of sustainable practices implementation by a coffee shop with a simultaneous information component for the population.

Keywords: coffee grounds, waste, craft soap, cleansing ability, sustainable development, sustainable practices.

А. О. Шкоп, канд. техн. наук, докторант, Н. Г. Пономарьова, канд. техн. наук, доцент,
О. В. Шестопапов, канд. техн. наук, доцент,
А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, Д. М. Войтенко аспірант,
В. С. Бутко, асистент

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ ЗОВНІШНІХ БАРДОНАКОПИЧУВАЧІВ У ПАЛИВНІ ПЕЛЕТИ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: післяспиртова барда, паливні пелети, бардонакопичувачі, утилізація відходів, механічне зневоднення, термічна сушка, грануляція, біопаливо, центрифугування.

Вступ. Спиртова промисловість є однією з ключових галузей, що забезпечує виробництво етанолу, однак вона генерує значні обсяги побічних продуктів, зокрема післяспиртової барди (ПСБ). Цей відхід, що накопичується у великих кількостях у зовнішніх бардонакопичувачах, створює серйозні екологічні та економічні виклики через свою високу вологість, низький вміст цінних речовин і складність транспортування. Традиційні методи утилізації барди, такі як виробництво кормів, добрив чи біогазу, мають обмеження, пов'язані з утворенням стічних вод, високими енерговитратами та непридатністю для переробки відпрацьованої барди, яка накопичувалася роками і містить механічні домішки. У той же час, зростання попиту на альтернативні джерела енергії та необхідність вирішення екологічних проблем стимулюють пошук нових підходів до утилізації таких відходів. Одним із перспективних напрямів є переробка післяспиртової барди у паливні пелети, які можуть використовуватися як екологічно чисте біопаливо з високою теплотворною здатністю. Ця стаття присвячена розробці технології переробки відпрацьованої барди з зовнішніх бардонакопичувачів у паливні пелети, що включає етапи механічного зневоднення, термічної сушки та грануляції, а також визначення оптимальних параметрів процесу для забезпечення економічної та екологічної ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі на більшості спиртових заводів світу барду переробляють різними способами, переважно для виробництва кормів. Транспортування непереробленої барди є економічно невигідним через великий об'єм рідини та відносно низький вміст цінних речовин, що робить перевезення цих відходів нерентабельним. Технології переробки барди умовно поділяються на чотири основні схеми [1, 2]:

- випарні станції з отримання сухих кормів чи добрив [3];
- аеробною мікробіологічною переробкою рідкої фази з отриманням кормових дріжджів [2];
- метантанками з отриманням біогазу [2];
- комбіновані схеми [1].

Комбіновані технологічні схеми базуються на перевірених і ефективних методах, які включають: відокремлення рідкої та твердої фаз за допомогою центрифуг [4, 5], культивування кормових дріжджів на відповідному субстраті [6], сушіння отриманої

продукції з подальшим використанням сухого залишку як добрива [7] або як кормової добавки для тварин [8, 9].

При розділенні післяспиртової барди в гравітаційному полі шляхом відстоювання або центрифугування утворюються осад і освітлена барда. Застосовуючи спільне або роздільне зневоднення цих компонентів, можна отримати чотири типи кормових продуктів [10–12]:

- висушений осад (DDG – Distillers Dried Grains);
- висушена освітлена барда (DDS – Distillers Dried Solubles);
- висушена суміш осаду та барди (DDGS – Distillers Dried Grains with Solubles);
- згущена освітлена барда з вмістом сухих речовин 30–40 % (CDS – Condensed Distillers Solubles).

Водночас варто зазначити, що переробка барди на сухі кормові добавки є доцільною лише для свіжої сировини та потребує значних енергетичних витрат на процес сушіння.

Ключовою проблемою залишається пошук ефективних способів утилізації відпрацьованих бардонакопичувачів, де відходи спиртової промисловості накопичувалися протягом багатьох років і стали непридатними для традиційного використання.

Обмеженість енергетичних ресурсів для опалення, виробництва технологічної пари та інших енергетичних потреб, а також екологічні виклики, пов'язані з традиційною енергетикою, сприяють зростанню популярності твердих органічних видів біопалива.

Аналіз наукової літератури показує, що сучасне біопаливо активно виготовляється з різних органічних відходів [13, 14], зокрема:

- відходів сільськогосподарських культур, таких як солома [15], бадилля кукурудзи [16], лузга насіння, рисове лушпиння [13] тощо;
- відходів деревообробної промисловості та деревини [13, 17, 18];
- відходів тваринницьких комплексів, включаючи відходи великої рогатої худоби та птахофабрик [19];
- органічних осадів стічних вод та інших органічних шламів [20].

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на широкий спектр методів переробки післяспиртової барди, що застосовуються у світовій практиці, проблема розробки економічно вигідної технології залишається актуальною, особливо для українських виробників етанолу, які часто не мають доступу до сучасних технологій утилізації органічних відходів. Світовий досвід демонструє, що одним із перспективних напрямів використання барди є її переробка на корми для тварин [8, 9]. Зокрема, виробництво кормових дріжджів [6] є поширеним методом, проте після цього процесу утворюється післядріжджова барда, яка є висококонцентрованою стічною водою. Переробка барди на добрива чи біогаз також супроводжується утворенням стічних вод. Інший спосіб утилізації – зрошення земель – застосовується лише окремими заводами як тимчасовий захід і має численні недоліки.

Ці обмеження вказують на необхідність пошуку нових підходів до утилізації багатотонажних відходів післяспиртової барди, що накопичуються у зовнішніх шламонакопичувачах спиртових заводів. Одним із перспективних рішень є переробка барди у паливні гранули. Головна перевага цього методу полягає у можливості використання відпрацьованої барди, яка через економічну недоцільність або

забруднення механічними домішками та пилом не придатна для інших методів утилізації, таких як переробка на корми чи добрива. Суха гранульована барда є екологічно безпечним біопаливом із теплотворною здатністю, порівнянною з високоякісною деревиною або деревним вугіллям, і зручна для дозування у твердопаливних котлоагрегатах.

В попередніх дослідженнях [21] було виявлено, що барда шламонакопичувачей є полідисперсною, містить тверді частинки та органічні речовини сухого залишку в кількості 50–60 г/л із вологістю 85–90 %. Досліджено закономірність вологовіддачі в процесі сушіння барди та показано можливість доведення зневодненої на центрифугах барди до вологості 10–14 %, якої достатньо для формування гранульованих паливних пелет. Визначено теплотворну здатність отриманих пелет, яка для зразків різних спиртових заводів склала 4600–5550 ккал/кг. На підставі проведених досліджень запропоновано ресурсозберігаючу технологію переробки барди в пелети та схему вузлів механічного зневоднення з використанням сучасних центрифуг. Дана стаття є продовженням досліджень, описаних в [21].

Новизна. Новизна дослідження полягає у розробці технологічного процесу переробки післяспиртової барди з зовнішніх бардонакопичувачів у паливні пелети, що дозволяє утилізувати відходи, непридатні для інших методів переробки. Запропонована технологія включає послідовне виконання етапів: видобуток барди за допомогою земснаряду, механічне зневоднення на центрифугах, термічне сушіння у барабанній сушарці та грануляцію для отримання паливних пелет із вологістю 5–12 %. Особливістю є адаптація процесу до барди з високим вмістом механічних домішок та низьким вмістом розчинених речовин, що раніше не розглядалося в літературі як сировина для біопалива. Експериментально визначено кінетику сушіння барди, оптимальні параметри механічного зневоднення та теплотворну здатність кінцевого продукту, що становить 17,9–19,9 МДж/кг, порівнянну з деревними пелетами. Також новизною є розрахунок енерговитрат та оптимізація роботи сушильного обладнання для забезпечення економічної ефективності процесу.

Мета і задачі дослідження. Мета даного дослідження полягає у розробці економічно ефективної технології переробки післяспиртової барди із зовнішніх бардонакопичувачів у паливні пелети з високою теплотворною здатністю, придатні для використання в твердопаливних котлоагрегатах. Це потрібно для вирішення проблеми утилізації багатотонажних відходів спиртової промисловості, зменшення екологічного навантаження від накопичення барди у зовнішніх шламонакопичувачах, а також створення альтернативного джерела біопалива для забезпечення енергетичних потреб спиртових заводів та інших промислових об'єктів.

Для досягнення зазначеної мети мали вирішити наступні завдання:

- визначити оптимальні параметри транспортування згущеної барди з бардонакопичувача до модуля переробки, включаючи використання земснаряду та пульпопроводу;
- розробити технологію механічного зневоднення барди до вологості 70–75 % з подальшим очищенням від механічних домішок;
- визначити кінетику сушіння барди в барабанній сушарці та оптимізувати параметри термічної сушки для досягнення вологості кінцевого продукту 5–12 %, придатного для грануляції.

Викладення основного матеріалу

1. Методика дослідження процесу сушіння післяспиртової барди

Термічна сушка барди після механічного зневоднення в центрифугі здійснювалася контактної сушарці. Контактну сушарку було виготовлено на базі шахтної печі СНОЛ. Нагрів нержавіючої колби сушарки здійснювався електричною спіраллю та автоматично підтримувалася температура $t \approx 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ під час роботи сушарки. Контроль температури колби здійснювався термопарами, розташованими внизу (T_H) та вгорі (T_B) колби.

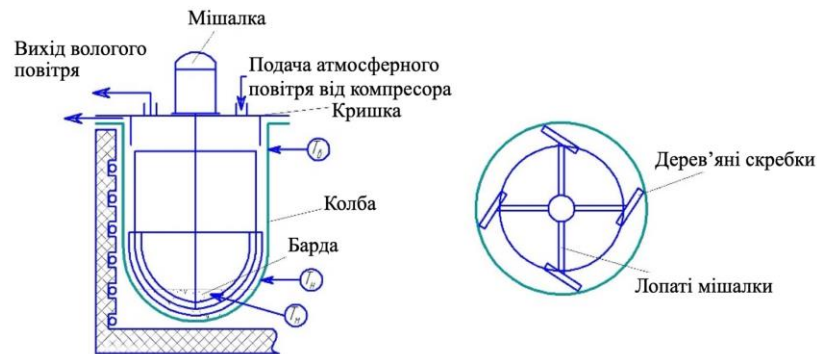


Рисунок 1 – Контактна сушарка

Перемішування барди в процесі термосушіння здійснювалося мішалкою якірного типу. На кожній із 4-х лопатей мішалки були змонтовані дерев'яні скребки, підігнані за профілем колби.

Обертання мішалки здійснювалося від мотор-редуктора ($N_{ел} = 0,75\text{ кВт}$, $n_{вих} = 11\text{ об/хв}$), змонтованої на кришці підйомної печі.

В середину сушарки подавалося атмосферне повітря вентилятором. Вихід вологого повітря проводився через отвори в кришці та зазорами між кришкою та колбою.

Для термічного сушіння відбирали згущену барду із зовнішнього накопичувача Артемівського спиртзаводу (рис. 2а). Перед термічним сушінням осад з накопичувача був зневоднений механічно в центрифугі Ecomash SHS 521A-113 (рис. 2б) до вологості 70–75 %.



Рисунок 2 – Фотографії відбору барди із бардонакопичувача (а) та центрифугальної установки Ecomash SHS 521A-113 (б)

2. Результати дослідження термічної сушки барди

Під час експериментальних досліджень було отримано кінетику сушіння осаду центрифуги після зневоднення ПСБ початковою вологістю 70,35 %

Таблиця 1 – Зміна абсолютної та відносної вологи осаду ПСБ

Час сушіння, t, хв	Абсолютна вологість, $W_{абс}$, кг/кг	Відносна вологість, $W_{відн}$, %
0	2,37	70,35
45	1,11	66,35
70	1,073	52,57
145	0,97	51,48
190	0,52	34,3
240	0,136	12,0

За даними табл. 1 побудовано залежність зміни абсолютної вологості матеріалу від часу (рис. 3).

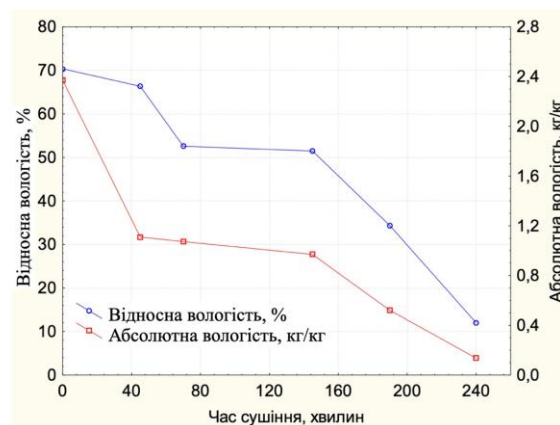


Рисунок 3 – Зміна абсолютної вологості $W_{абс}$ у часі t

Із залежності абсолютної вологості від часу ми можемо виділити два періоди сушіння: період сталої швидкості та період падіння швидкості висушування матеріалу.

Тривалість усього періоду сушіння визначають, як суму тривалості в період сталої швидкості та тривалості в період падаючої швидкості.

Період сталої швидкості сушіння визначають за формулою 1:

$$\tau_1 = \frac{\omega_1 - \omega_{кр}^1}{C}. \quad (1)$$

Період падаючої швидкості визначається за формулою 2:

$$\tau_2 = \frac{\omega_{кр}^1 - \omega_p}{C} \ln \frac{\omega_{кр}^1 - \omega_p}{\omega_2 - \omega_p}, \quad (2)$$

де ω_1 , ω_2 , ω_p – початкова, кінцева та рівноважна вологість матеріалу, 1 кг вологи на 1 кг сухої речовини; $\omega_{кр}^1$ – перша критична вологість матеріалу (наприкінці першого періоду сушіння).

Після експериментальних вимірів кількості випареної вологи в часі знаходиться коефіцієнт сушіння, який визначається за формулою 3:

$$C = \frac{W}{\tau \cdot G_c}, \quad (3)$$

де W – кількість випареної вологи, кг; τ – тривалість сушіння, сек; G_c – маса сухої речовини, кг.

Експеримент показує, що в початковий момент першого періоду сушіння вологість складала 2,37 кг/кг, через 50 хвилин або 3000 секунд (наприкінці першого періоду сушіння) вона стала 1,073 кг/кг. Тобто випарувалося води $W = 2,37 - 1,073 = 1,297$ кг/кг. Маса сухої речовини приймається $G_c = 1,0$ кг.

Тому, згідно формули 3 коефіцієнт сушіння складає:

$$C = \frac{1,297}{3000 \cdot 1,0} = 4,323 \cdot 10^{-4} \text{ 1/сек.}$$

Відповідні вологості набувають наступні значення:

$\omega_1 = 3,0$ кг/кг – таку вологість планується отримати для живлення сушарки. Це 75 % відносної вологості для вивантаженого із центрифуги осаду.

$\omega_{кр}^1 = 1,073$ кг/кг – критична вологість матеріалу в кінці першого періоду сушіння.

$\omega_2 = 0,136$ кг/кг – кінцева вологість висушеного матеріалу.

$\omega_p = 0,111$ кг/кг – рівноважна вологість отримана експериментально після сушіння близько 12 годин.

У підсумку згідно формул 1 та 2 визначаємо:

$$\tau_1 = \frac{\omega_1 - \omega_{кр}^1}{C} = \frac{3,0 - 1,073}{4,323 \cdot 10^{-4}} = 4457,6 \text{ сек};$$

$$\tau_2 = \frac{\omega_{кр}^1 - \omega_p}{C} \ln \frac{\omega_{кр}^1 - \omega_p}{\omega_2 - \omega_p} = \frac{1,073 - 0,111}{4,323 \cdot 10^{-4}} \ln \frac{1,073 - 0,111}{0,136 - 0,111} = 8122,6 \text{ сек.}$$

Тоді, сумарний час складає:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 4457,6 + 8122,6 = 1,258 \cdot 10^4 \text{ сек} = 3,494 \text{ год.}$$

3. Розрахунок процесу сушки барди для виробництва пелет

Проведено технологічний розрахунок процесу сушіння робочих умов, тобто для барабанної сушарки з діаметром барабана 1500 мм, довжиною барабана 9000 мм. В ре-

зультаті встановлено, що середня витрата матеріалу, що висушується, по перерізу барабана повинна становити 2586,18 кг/год.

Тоді середній час перебування матеріалу в барабані для робочих умов процесу $\tau = 0,9836$ годин, при $\psi = 0,2$ – ступінь заповнення барабана.

Бачимо, що необхідний час тривалості сушіння для 1000 кг/год висушеної барди $\tau = 3,94$ годин, а для робочих умов дійсної барабанної сушарки (діаметр барабана 1500 мм, довжина барабана 9000 мм) час сушіння $\tau = 0,9836$ годин. Звідси випливає, що для забезпечення умов сушіння необхідно знизити подачу живлення в сушарку $\approx$ в 3,5 рази. Тобто, до продуктивності сухої речовини в живленні 285,7 кг/год, а по вологому до 1142,85 кг/год.

Додатково проаналізовано приблизні енерговитрати на термосушку барди в барабанній сушарці Артемівського заводу, живлення печі якої виробляється пелетами з лушпиння соняшника:

1. Витрата пелет $\Pi = 160,0$ кг/год. Теплотворна здатність пелетів $q_p = 17,9 \div 19,9$ МДж/кг.

2. Витрата живлення барабанної сушарки по сухій речовині $G_{\text{сух}} = 400,0$ кг/год.

3. Вологість живлення, що входить у барабан $W_1 = 65,0$ %.

4. Вологість висушеного продукту $W_2 = 7,5$ %.

5. Діаметр барабану 2500 мм, довжина барабана 6000 мм.

Потужність тепла, яку виробляють пелети при спалюванні

Прийнято середнє значення $q_p = 19,0$ МДж/кг

$$P = \frac{\Pi \cdot q_p}{3600} = \frac{160,0 \cdot 19,0}{3600} = 0,844 \text{ МВт.} \quad (4)$$

Розрахунок кількості випаровуваної в барабані води

Витрата масової води, що випаровується, визначається з рівняння:

$$W = G_{\text{сух}} \cdot \left(\frac{W_1}{100 - W_1} - \frac{W_2}{100 - W_2} \right) = 400,0 \cdot \left(\frac{65,0}{100 - 65,0} - \frac{7,5}{100 - 7,5} \right) = 710,417 \text{ кг/год.} \quad (5)$$

Потрібна для випаровування води потужність обчислюється за формулою 6:

$$Q = \frac{q \cdot W}{3600} = \frac{2,8683 \cdot 710,417}{3600} = 0,566 \text{ МВт.} \quad (6)$$

Питома витрата тепла на сушіння 1 кг барди згідно формули 7 дорівнює:

$$q = 2868,3 \text{ кДж/кг} = 2,8683 \text{ МДж/кг.} \quad (7)$$

Потужність, що генерується при спалюванні пелет, більша, ніж потрібна потужність для сушіння барди діючого виробництва.

Однак, необхідно продовжити оптимізацію за витратою пелет, подачі повітря для зниження втрат тепла з аспірацією (зниження тиску повітря в барабанній сушарці) барди із зовнішнього накопичувача.

4. Аналіз обсягів утилізації барди зовнішнього накопичувача

Розрахунок кількості барди в 1-му накопичувачі та час виїмки:

- Допустимо $V_{\text{накоп}} = 20000 \text{ м}^3$, глибина 6 м.
- Ступінь заповнення 85...90 %, тобто. Об'єм згущеної барди $W = 85 \%$ складає $V_{\text{п}} = 17000...18000 \text{ м}^3$, або сухої барди 2550...2700 т.
- Понтон вибирає із 6 м глибини 5 м, тобто. $5/6 V_{\text{п}} = 14167...15000 \text{ м}^3$, або ~ 2250 т сухої барди з одного відстійника.
- Інші 2700 т – 2250 т = 450 т обирає будівельна техніка як замерзлий ґрунт у зимові місяці.
- При роботі центрифуг у 3-х продуктовому режимі вихід завислих речовин у кек буде $\geq 0,85$, відповідно вихід барди в пелету складе $2250 \text{ т} \cdot 0,85 = 1912,5 \text{ т}$ сухої барди з одного накопичувача об'ємом 20000 м^3 .
- При продуктивності 9...10 т сухої барди за добу час переробки 1-го накопичувача $V_{\text{накоп}} = 20000 \text{ м}^3$ буде складати:
 $(1912,5...2295) : (9...10) = 212...230 \text{ діб} = 7...8 \text{ міс.} + 1 \text{ місяць у зимовий період будівельної техніки.}$
- Загальна кількість сухої барди з одного накопичувача з урахуванням переробленої в пелети складе: $1912,5 \text{ т} + 450 \cdot 0,14 = 1975,5 \text{ т}$ або з урахуванням 5 % вологості готових пелет ~ 2080 т.

Для організації термосушіння в обсязі 1000 кг/годину по сухій барді (з вихідною вологістю барди ~75 %) необхідні додаткові потужності до сушарки діаметром 1,5 м, довжиною 9 м. Для термосушіння барди продуктивністю 1 т/годину по сухому рекомендується замовити пелетний теплогенератор потужністю $N \sim 2 \text{ МВт}$, якщо буде використана сушарка діаметром 1,5 м, то теплогенерація становитиме $2 \text{ МВт} = 0,6 \text{ МВт} + 1,4 \text{ МВт}$.

В процесі гранулювання температура пелет піднялася до 90 °С, після охолодження гранул барди на повітрі вологість пелет з барди склала 5 %. Зовнішній вигляд гранул із барди зовнішнього накопичувача представлений на рис 4.



Рисунок 4 – Фотографія гранул паливних пелет із барди зовнішнього накопичувача діаметром 3 мм

Визначено теплотворну здатність пелет [21], отриманих після гранулювання зневодненої барди, яка для зразків різних спиртових заводів склала 4600–5550 ккал/кг (17,9–19,9 МДж/кг).

5. Розробка технології переробки післяспиртової барди зовнішнього бардонакопичувача

Зважаючи на те, що згущений продукт барди, що зберігається у зовнішніх накопичувачах спиртзаводів, містить меншу кількість розчинених речовин (у тому числі білків), ніж свіжа барда і має високу теплотворну здатність, доцільно використовувати згущений продукт барди із зовнішніх накопичувачів як сировину для паливних пелет або мінеральних добрив.

Розрахована якісно-кількісна схема переробки барди наведено на рис. 5. На рис. 6–10 наведено ескізи компонування обладнання з вилучення барди із зовнішнього накопичувача та схема Модуля механічного зневоднення барди, розробленого на ТОВ «НТЦ «Екомаш».

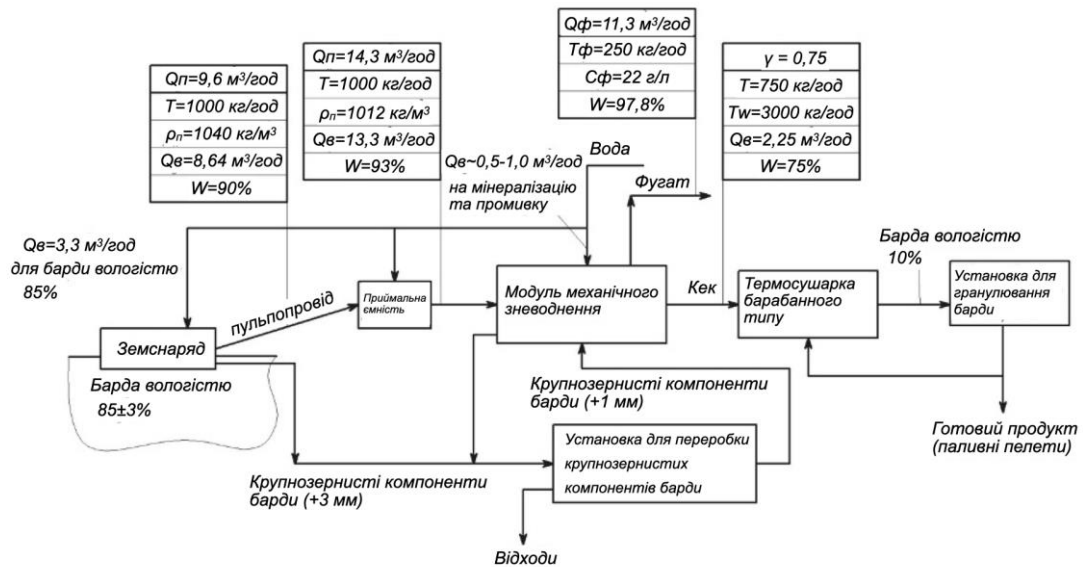


Рисунок 5 – Якісно-кількісна схема переробки барди із зовнішнього накопичувача:

Q_v – витрата води, м³/год; Q_p – витрата пульпи барди, м³/год; T – продуктивність по твердому, кг/год; ρ_p – щільність пульпи барди, кг/м³; W – вологість барди; Q_f – витрата фугату, м³/год; T_f – винос твердого у фугат, кг/год; C_f – вміст твердого у фугаті, г/л; γ – вихід твердого в осад; T_w – продуктивність по вологому осаді, кг/год

Згідно запропонованої схеми барда із зовнішнього шламонакопичувача видобувається за допомогою земснаряд (рис. 6) з вологістю 85 % розбавляється водою до 93 % та подається у пульпопровід, який транспортує її до приймальної ємності з мішалкою (рис. 7). Далі барда зневоднюється на центрифугах Модуля механічного зневоднення барди (рис. 8, рис. 9) до приблизно 75 %. Осад центрифуг подається в барабанну сушарку (рис. 10), де відбувається висушування барди до 10–12 %. В такому вигляді барда гранулюється в паливні пелети.

Відходи класифікації барди за класами 3 мм, 1 мм складуються разом із бардою, витягнутою в зимовий період, на окремий майданчик для поділу барди від механічних домішок, після цього барда повертається у виробництво пелет.

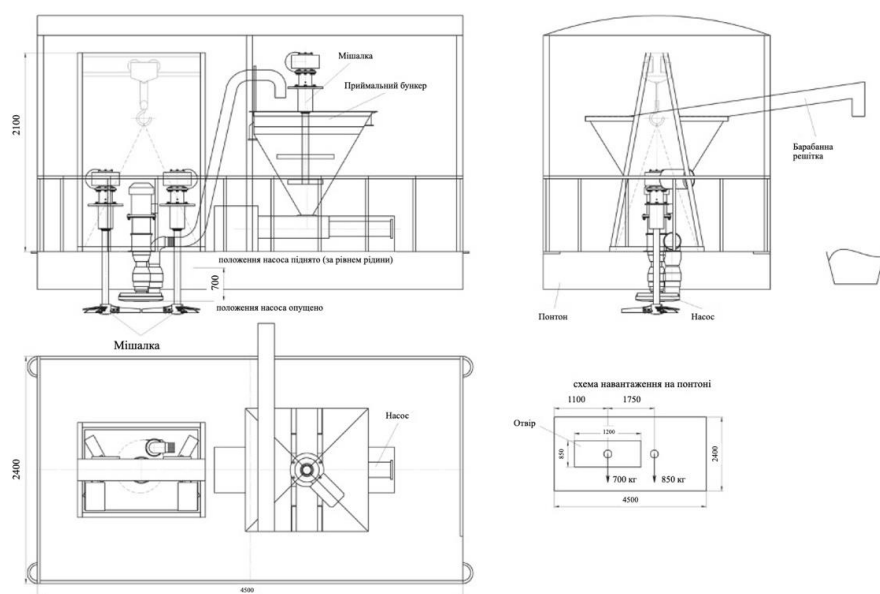


Рисунок 6 – Ескіз земснаряду для видобування барди з бардонакопичувача

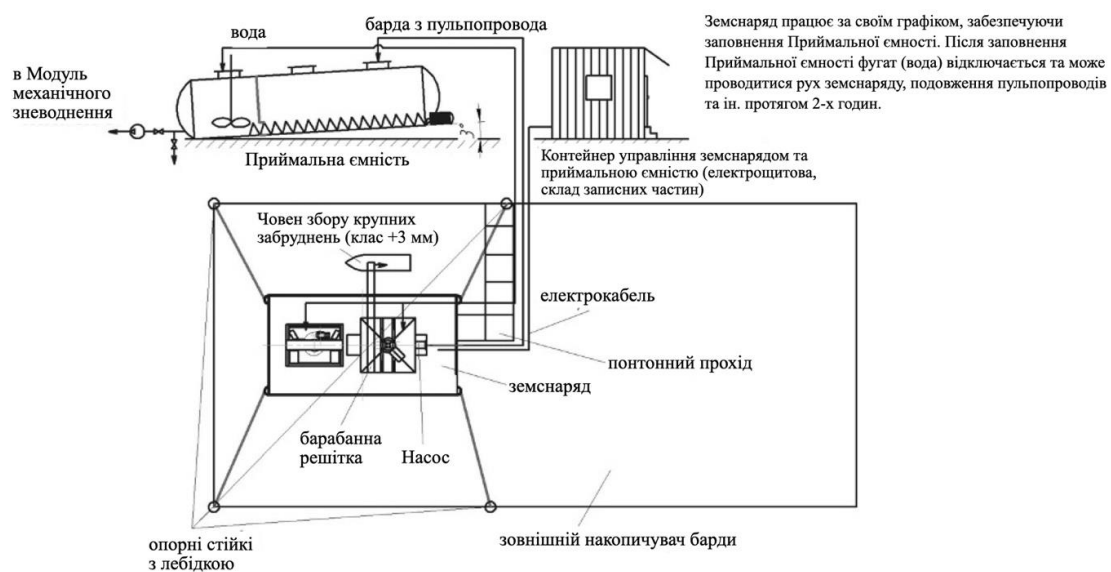


Рисунок 7 – Схема видобутку барди із зовнішнього накопичувача

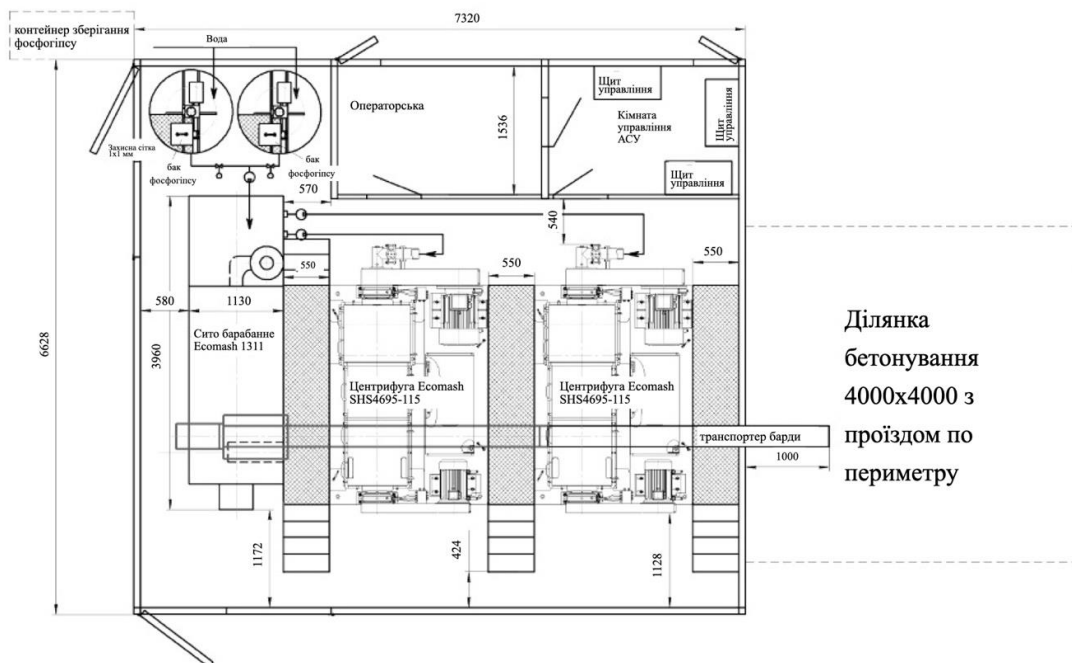


Рисунок 8 – Компонування Модуля механічного зневоднення барди вид зверху з центрифугами Ecomash SHS 521S-113, що працюють у трипродуктовому режимі

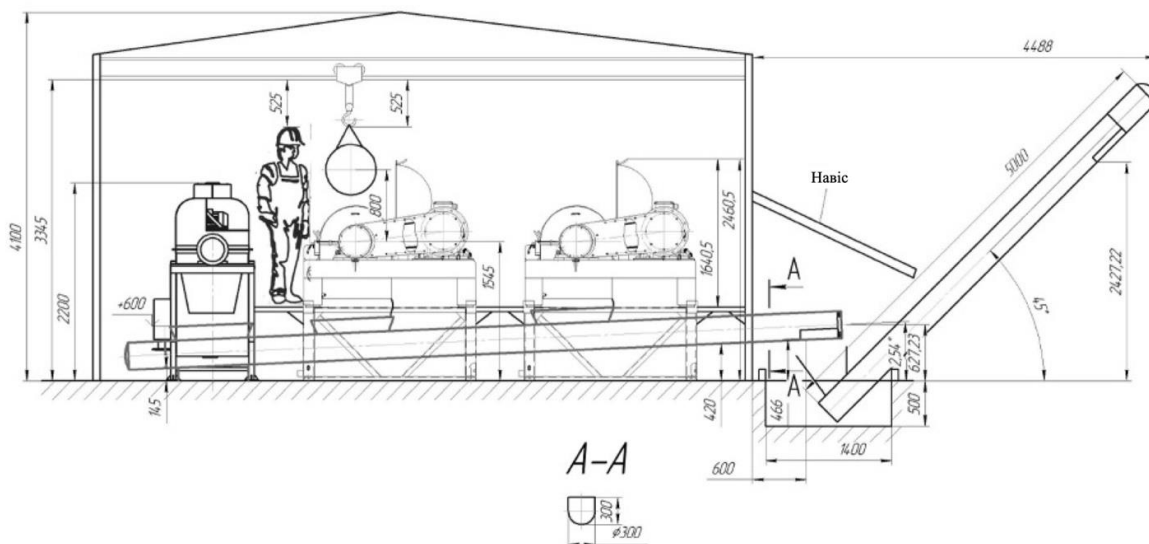


Рисунок 9 – Компонування Модуля механічного зневоднення барди ТОВ «НТЦ «Екомаш» вид спереду

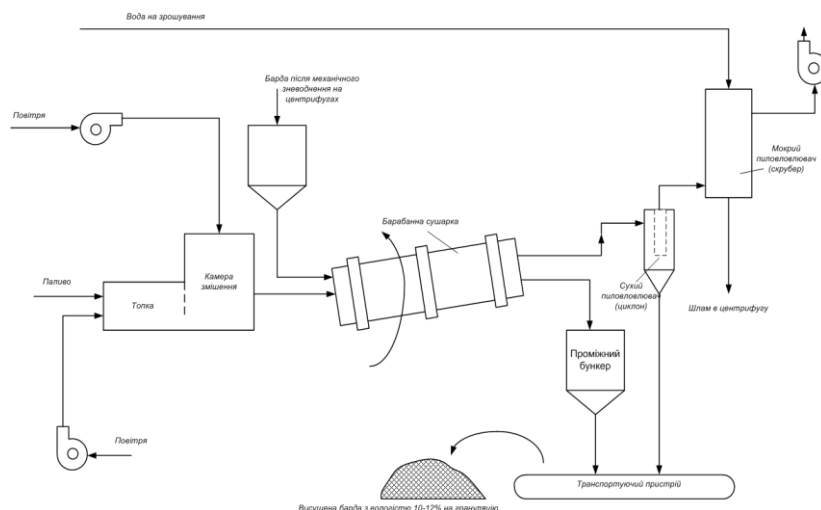


Рисунок 10 – Схема роторної прямоточної сушарки барабанного типу

Таким чином, запропоновані технологічні рішення та устатковування є перспективними та дають змогу налагодити виробництво паливних пелет з ПСБ шламонакопичувачей та мають наступні переваги для спиртових заводів України:

- дозволяють вивільнити відпрацьовані бардонакопичувачі від ПСБ та позбутися необхідності будувати нові, що в свою чергу призводить до зменшення впливу на довкілля;
- перетворити відходи ПСБ, які не мають цінність для переробки у кормові добавки чи добрива у цінний продукт, який може бути використаний на самому виробництві спирту в якості альтернативного палива для отримання пари;
- запропонована технологія не потребує додаткового тепла на процес висушування барди у разі використання отриманих пелет для енергозабезпечення сушарки.

Висновки. За результатами проведеного дослідження розроблено технологію переробки післяспиртової барди з зовнішніх бардонакопичувачів у паливні пелети, що дозволяє ефективно утилізувати відходи спиртової промисловості, непридатні для традиційних методів переробки.

Запропонована технологічна схема включає видобуток барди за допомогою земснаряду, її транспортування пульпопроводом, механічне зневоднення на центрифугах до вологості 70–75 %, термічну сушку в барабанній сушарці до вологості 10–12 % та подальшу грануляцію. Експериментально визначено кінетику сушіння барди, яка складається з двох періодів – постійної та падаючої швидкості, що дозволило оптимізувати тривалість процесу сушки до 3,494 години для 1000 кг/год сухої барди. Отримані паливні пелети мають теплотворну здатність 17,9–19,9 МДж/кг, що порівнянно з деревними пелетами, та вологість 5 % після охолодження, що робить їх придатними для використання в твердопаливних котлоагрегатах.

Розраховано, що переробка барди з накопичувача об'ємом 20000 м³ займає 7–8 місяців при продуктивності 9–10 т/добу сухої барди, з урахуванням зимового періоду для видобутку залишків будівельною технікою. Загальна кількість отриманої сухої барди становить приблизно 2080 т з одного накопичувача. Запропонована технологія є економічно обґрунтованою, оскільки дозволяє знизити енерговитрати шляхом оптимізації подачі сировини та використання пелетного теплогенератора потужністю 2 МВт.

Розробка забезпечує вирішення екологічних проблем, пов'язаних із накопиченням відходів, і створює альтернативне джерело біопалива, що сприяє сталому розвитку спиртової промисловості.

Література

1. Бухкало С., Ольховська О., Ольховська В., Зіпуніков М. Дослідження та аналіз інноваційних заходів щодо комплексної технології переробки зернових відходів дистиляції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження в студентських наукових роботах. 2019. № 15. С. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.20998/2220-4784.2019.15.12>.
2. Потапова М. В., Голуб Н. Б. Сучасні методи переробки й утилізації зернової післяспиртової барди. *Innovative Biosystems & Bioengineering*. 2018. No. 2(2). С. 125–134. DOI: <https://doi.org/10.20535/ibb.2018.2.2.125733>.
3. Krzywonos M., Cibis E., Miśkiewicz T., Ryznar-Luty A. Utilization and biodegradation of starch stillage (distillery wastewater). *Electronic Journal of Biotechnology*. 2009. Vol. 12(1). DOI: <https://doi.org/10.2225/vol12-issue1-fulltext-5>.
4. Ольшаківський І. М., Михайлов І. М., Іванчук В. І. Інноваційна технологія комплексної переробки зернової післяспиртової барди. Київ : НУХТ, 2022. 85 с.
5. Босюк А., Шкоп А., Пономарьова Н., Шестопапов О., Матісс Д. Очищення бурових розчинів з використанням осаджувальних центрифуг. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2025. № 349(2). С. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-9>.
6. Єгоров Б., Кананихіна О., Турпурова Т. Технологія виробництва білково-вітамінної добавки біотехнологічним методом. 2019. № 82(2). С. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i2.1168>.
7. Малицький Я. С., Брошак І. С., Ориник Б. І., Бровко О. З., Михайчук М. А. Використання барди як органічного добрива. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2022. № 4(100). DOI: <https://doi.org/10.31713/vs4202212>.
8. Казаков Д. Д., Рожевський Ю. П. Розробка технологічного процесу переробки післяспиртової барди для використання її в харчовій промисловості. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2017. № 10. С. 113–116. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2017_10_27.
9. Булій Ю. В., Мукоїд Р. М., Ольшаківський І. М., Михайлов І. М., Іванчук В. Г., Іванчук В. В. Інноваційна технологія комплексної переробки зернової післяспиртової барди. Київ, 2022.
10. Malvandi A., Nicole Coleman D., Loo J. J., Feng H. A novel sub-pilot-scale direct-contact ultrasonic dehydration technology for sustainable production of distillers dried grains (DDG). *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Vol. 85. P. 105982. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105982>.
11. Iram A., Cekmecelioglu D., Demirci A. Distillers' dried grains with solubles (DDGS) and its potential as fermentation feedstock. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020. Vol. 104(14). P. 6115–6128. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10682-0>.
12. Pesta A. C., Nuttelman B. L., Shreck A. L., Griffin W. A., Klopfenstein T. J., Erickson G. E. Finishing performance of feedlot cattle fed condensed distillers solubles.

Journal of Animal Science. 2015. Vol. 93(9). P. 4350–4357. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9247>.

13. Клименко В. В., Кравченко В. І., Боков В. М., Гуцул В. І. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів : монографія / за ред. В. В. Клименка. Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. 162 с.

14. Калетник Г., Пришляк Н. Розвиток біопаливної промисловості як детермінанта сталого розвитку України. Економіка АПК. 2021. № 316(2). С. 71–81. DOI: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202102071>.

15. Бурлака С. А., Гуменюк Ю. В., Галушак О. О. Потенціал використання соломи зернових культур як біопалива. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2020. № 153(6). С. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-153-6-57-64>.

16. Гончарук І. В., Ємчик Т. В., Купчук І. М., Телекало Н. В., Гонтарук Я. В. Напрями удосконалення вирощування та переробки кукурудзи для біопалива. Таврійський науковий вісник. 2022. № 125. С. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.125.4>.

17. Економічна доцільність виробництва твердого біопалива з енергетичних культур в Україні : кол. монографія / [Кизим М. О., Хаустова В. Є., Костенко Д. М., Котляров Є. І., Салашенко Т. І., Губарева І. О.]. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2023. 242 с.

18. Масикевич А. Ю., Яремчук В. М., Бать Р. Я., Масикевич Ю. Г., Малований М. С., Атаманюк В. М. Утилізація деревних відходів шляхом виготовлення паливних гранул методом екструзії. Науковий вісник НЛТУ України. 2019. № 29(1). С. 93–97. DOI: <https://doi.org/10.15421/40290120>.

19. Екологічно дружні технологічні рішення для місцевих громад щодо поводження з відходами : збірка матеріалів Національного форуму «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології» (м. Київ, 23–24 листопада 2021 р.). Київ : Центр екологічної освіти та інформації, 2021. 275 с.

20. Альтернативні технологічні рішення проблеми повної утилізації мулового осаду стічних вод / [кол. авт.]. *Комунальне господарство міст. Серія «Економічні науки»*. 2018. № 144. С. 32–42. <https://khges.kname.edu.ua/index.php/khges/article/view/5250>.

21. Shkop A., Shestopalov O., Ponomarova N. та ін. Method design for distillers solubles recycling and reusing into fuel pellets. *Petroleum and Coal*. 2025. Vol. 67(1). P. 508–522.

Bibliography (transliterated)

1. Bukhkalov S., Olkhovska O., Olkhovska V., Zipunikov M. Doslidzhennia ta analiz innovatsiinykh zakhodiv shchodo kompleksnoi tekhnolohii pererobky zernovykh vidkhodiv dystyliatsii. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriia: Innovatsiini doslidzhennia v studentskykh naukovykh robotakh. 2019. No. 15. P. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.20998/2220-4784.2019.15.12>.

2. Potapova M. V., Holub N. B. Suchasni metody pererobky y utylizatsii zernovoi pisliaspyrtovoi bardy. *Innovative Biosystems & Bioengineering*. 2018. No. 2(2). P. 125–134. DOI: <https://doi.org/10.20535/ibb.2018.2.2.125733>.

3. Krzywonos M., Cibis E., Miśkiewicz T., Ryznar-Luty A. Utilization and biodegradation of starch stillage (distillery wastewater). *Electronic Journal of Biotechnology*. 2009. Vol. 12(1). DOI: <https://doi.org/10.2225/vol12-issue1-fulltext-5>.

4. Olshakovskiy I. M., Mykhailov I. M., Ivanchuk V. I. Innovatsiina tekhnolohiia kompleksnoi pererobky zernovoi pisliaspyrtovoi bardy. Kyiv : NUKhT, 2022. 85 p.
5. Bosiuk A., Shkop A., Ponomarova N., Shestopalov O., Matiss D. Ochyshchennia burovykh rozchyniv z vykorystanniam osadzhuvalnykh tsentryfuh. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. 2025. No. 349(2). P. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-9>.
6. Iehorov B., Kananykhina O., Turpurova T. Tekhnolohiia vyrobnytstva bilkovo-vitaminnoi dobavky biotekhnolohichnym metodom. 2019. No. 82(2). P. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i2.1168>.
7. Malyskyi Ya. S., Broshchak I. S., Orynyk B. I., Brovko O. Z., Mykhaichuk M. A. Vykorystannia bardy yak orhanichnoho dobryva. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*. 2022. No. 4(100). DOI: <https://doi.org/10.31713/vs4202212>.
8. Kazakov D. D., Rozhevskiy Yu. P. Rozrobka tekhnolohichnoho protsesu pererobky pisliaspyrtovoi bardy dlia vykorystannia yii v kharchovii promyslovosti. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu*. 2017. No. 10. P. 113–116. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2017_10_27.
9. Bulii Yu. V., Mukoid R. M., Olshakovskiy I. M., Mykhailov I. M., Ivanchuk V. H., Ivanchuk V. V. Innovatsiina tekhnolohiia kompleksnoi pererobky zernovoi pisliaspyrtovoi bardy. Kyiv, 2022.
10. Malvandi A., Nicole Coleman D., Loor J. J., Feng H. A novel sub-pilot-scale direct-contact ultrasonic dehydration technology for sustainable production of distillers dried grains (DDG). *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Vol. 85. P. 105982. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105982>.
11. Iram A., Cekmecelioglu D., Demirci A. Distillers dried grains with solubles (DDGS) and its potential as fermentation feedstock. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020. Vol. 104(14). P. 6115–6128. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10682-0>.
12. Pesta A. C., Nuttelman B. L., Shreck A. L., Griffin W. A., Klopfenstein T. J., Erickson G. E. Finishing performance of feedlot cattle fed condensed distillers solubles. *Journal of Animal Science*. 2015. Vol. 93(9). P. 4350–4357. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9247>.
13. Klymenko V. V., Kravchenko V. I., Bokov V. M., Hutsul V. I. Tekhnolohichni osnovy vyhotovlennia biopalyva z roslынnykh vidkhodiv ta yikh kompozytiv : monohrafiia / za red. V. V. Klymenka. Kropyvnytskyi : PP «Ekskluzyv-System», 2017. 162 p.
14. Kaletnyk H., Pryshliak N. Rozvytok biopalyvnoi promyslovosti yak determinanta staloho rozvytku Ukrainy. *Ekonomika APK*. 2021. No. 316(2). P. 71–81. DOI: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202102071>.
15. Burlaka S. A., Humeniuk Yu. V., Halushchak O. O. Potentsial vykorystannia solomy zernovykh kultur yak biopalyva. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2020. No. 153(6). P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-153-6-57-64>.
16. Honcharuk I. V., Yemchuk T. V., Kupchuk I. M., Telekalo N. V., Hontaruk Ya. V. Napriamy udoskonalennia vyroshchuvannia ta pererobky kukurudzy dlia biopalyva. *Tavriiskiyi naukoviyi visnyk*. 2022. No. 125. P. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.125.4>.
17. Ekonomichna dotsilnist vyrobnytstva tverdoho biopalyva z enerhetychnykh kultur v Ukraini : kol. monohrafiia / [Kyzym M. O., Khaustova V. Ye., Kostenko D. M., Kotliarov Ye. I., Salashenko T. I., Hubarieva I. O.]. Kharkiv : FOP Liburkina L. M., 2023. 242 p.

18. Masykevych A. Yu., Yaremchuk V. M., Bat R. Ya., Masykevych Yu. H., Malovanyi M. S., Atamaniuk V. M. Utylizatsiia derevnykh vidkhodiv shliakhom vyhotovlennia palyvnykh hranul metodom ekstruzii. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*. 2019. No. 29(1). P. 93–97. DOI: <https://doi.org/10.15421/40290120>.

19. Ekolohichno druzhni tekhnolohichni rishennia dlia mistsevykh hromad shchodo povodzhennia z vidkhodamy : zbirka materialiv Natsionalnoho forumu «Povodzhennia z vidkhodamy v Ukraini: zakonodavstvo, ekonomika, tekhnolohii» (m. Kyiv, 23–24 lystopada 2021 r.). Kyiv : Tsentr ekolohichnoi osvity ta informatsii, 2021. 275 p.

20. Alternatyvni tekhnolohichni rishennia problemy povnoi utylyzatsii mulovoho osadu stichnykh vod / [kol. avt.]. *Komunalne hospodarstvo mist. Seriia «Ekonomichni nauky»*. 2018. No. 144. P. 32–42. <https://khges.kname.edu.ua/index.php/khges/article/view/5250>.

21. Shkop A., Shestopalov O., Ponomarova N. ta in. Method design for distillers solubles recycling and reusing into fuel pellets. *Petroleum and Coal*. 2025. Vol. 67(1). P. 508–522.

УДК 504.06:628.543:662.6

А. О. Шкоп, канд. техн. наук, докторант, Н. Г. Пономарьова, канд. техн. наук, доцент, О. В. Шестопалов, канд. техн. наук, доцент, А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, Д. М. Войтенко аспірант, В. С. Бутко, асистент

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ ЗОВНІШНІХ БАРДОНАКОПИЧУВАЧІВ У ПАЛИВНІ ПЕЛЕТИ

У даній роботі представлено розробка інноваційна технологія переробки післяспиртової барди, накопиченої у зовнішніх бардонакопичувачах спиртових заводів, у паливні пелети, що можуть використовуватися як екологічно чисте біопаливо з високою теплотворною здатністю. Запропонована технологія передбачає комплексний підхід, що включає видобуток барди за допомогою земснаряду, її транспортування пульпопроводом, механічне зневоднення на центрифугах до вологості 70–75 %, термічну сушку в барабанній сушарці до вологості 10–12 % та грануляцію для отримання паливних пелет діаметром 3 мм. Експериментально визначено кінетику сушіння барди, яка складається з періодів постійної та падаючої швидкості, що дозволило оптимізувати тривалість процесу до 3,494 години для продуктивності 1000 кг/год сухої барди. Отримані пелети мають теплотворну здатність 17,9–19,9 МДж/кг та вологість 5 % після охолодження, що забезпечує їх придатність для використання в твердопаливних котлоагрегатах. У статті проаналізовано обсяги утилізації барди з накопичувача об'ємом 20 000 м³, що становить приблизно 2080 т сухої барди за 7–8 місяців переробки при продуктивності 9–10 т/добу. Для забезпечення процесу рекомендовано використання пелетного теплогенератора потужністю 2 МВт, що дозволяє знизити енерговитрати завдяки оптимізації подачі сировини та повітря. Проведено розрахунки енергетичних витрат на сушку, які показали, що теплова потужність, генерована спалюванням пелет із лузги соняшнику (0,844 МВт), перевищує необхідну для сушіння барди (0,566 МВт), що підтверджує економічну доцільність технології. Запропонований підхід дозволяє не лише вирішити екологічні проблеми, пов'язані з накопиченням відходів спиртової промисловості, а й створити альтернативне джерело біопалива, яке може бути використано для забезпечення

енергетичних потреб спиртових заводів та інших промислових об'єктів. У статті наведено результати експериментальних досліджень, проведених на барді Артемівського спиртового заводу, а також технологічні розрахунки для барабанної сушарки діаметром 1500 мм і довжиною 9000 мм, що підтверджують можливість масштабування процесу. Перспективи подальших досліджень включають оптимізацію енерговитрат, удосконалення методів очищення барди від домішок і розробку автоматизованих систем контролю процесу переробки.

Ключові слова: післяспиртова барда, паливні пелети, бардонакопичувачі, утилізація відходів, механічне зневоднення, термічна сушка, грануляція, біопаливо, центрифугування.

A. O. Shkor, N. G. Ponomarova, O. V. Shestopalov, A. S. Bosiuk, D. M. Voitenko,
V. S. Butko

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR PROCESSING POST-ALCOHOL STILLAGE FROM EXTERNAL STILLAGE STORAGE FACILITIES INTO FUEL PELLETS

This paper presents the development of an innovative technology for processing post-distillation stills accumulated in external stills storage tanks of distilleries into fuel pellets that can be used as an environmentally friendly biofuel with high calorific value. The proposed technology involves a comprehensive approach that includes the extraction of bard using a dredger, its transportation by a pulp pipeline, mechanical dehydration in centrifuges to a moisture content of 70–75 %, thermal drying in a drum dryer to a moisture content of 10–12 %, and granulation to obtain fuel pellets with a diameter of 3 mm. The drying kinetics of the bard were experimentally determined, which consists of periods of constant and falling speed, which allowed optimizing the process duration to 3.494 hours for a productivity of 1000 kg/h of dry bard. The obtained pellets have a calorific value of 17.9–19.9 MJ/kg and a moisture content of 5 % after cooling, which ensures their suitability for use in solid fuel boilers. The article analyzes the volume of waste wood recycling from a storage tank with a volume of 20,000 m³, which is approximately 2080 tons of dry waste wood for 7–8 months of processing at a productivity of 9–10 tons/day. To ensure the process, it is recommended to use a pellet heat generator with a capacity of 2 MW, which allows reducing energy consumption by optimizing the supply of raw materials and air. Calculations of energy costs for drying were carried out, which showed that the thermal power generated by burning sunflower husk pellets (0.844 MW) exceeds that required for drying the husk (0.566 MW), which confirms the economic feasibility of the technology. The proposed approach allows not only to solve environmental problems associated with the accumulation of alcohol industry waste, but also to create an alternative source of biofuel that can be used to meet the energy needs of alcohol plants and other industrial facilities. The article presents the results of experimental studies conducted at the Artemivsk distillery, as well as technological calculations for a drum dryer with a diameter of 1500 mm and a length of 9000 mm, which confirm the possibility of scaling the process. Prospects for further research include optimizing energy consumption, improving methods for cleaning the wort from impurities, and developing automated systems for controlling the processing process.

Keywords: post-alcohol stillage, fuel pellets, stillage accumulators, waste disposal, mechanical dehydration, thermal drying, granulation, biofuel, centrifugation.

В. В. Пурис, аспірант, В. В. Лебедєв, д-р техн. наук, доцент

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АГЛОМЕРАТІВ З ВІДХОДІВ ПОЛІАМІДІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: відходи, поліаміди, агломерат, підвищення, характеристики, міцність, методи.

Вступ. Поліамід-6 (ПА6), або нейлон-6, є одним з найпоширеніших інженерних термопластів, який широко застосовують у виробництві технічних деталей, автомобільних компонентів, текстильних волокон, технічних деталей, плівок та пакувальних матеріалів завдяки високим механічним і термічним характеристикам, стійкості до зношування та хімічних впливів. Однак виробництво та використання великої кількості ПА6 супроводжується накопиченням значних обсяг утворення промислових та побутових відходів ПА6 – зокрема, текстильних обрізків, зношених риболовних сіток, автомобільних компонентів – вимагає розробки технологій ефективного їх повторного використання та рециклінгу.

Сучасний період розвитку полімерного матеріалознавства характеризується підвищеним науковим і комерційним інтересом до сумішевих матеріалів на основі відходів ПА6 внаслідок практично необмежених можливостей швидкого та економічно вигідного розширення їх асортименту під конкретне застосування [1–5]. Серед різноманітних сумішей ПА6 найбільш важливу роль мають суміші ПА6 з поліолефінами. Ці суміші характеризуються поруч переваги порівняно з гомополімерами. Зокрема, на відміну від поліолефінів вони володіють високою стійкістю до нафтопродуктів і стиранню, а в порівнянні з ПА6 – пониженим водопоглиненням, підвищеною морозостійкістю і стійкістю до ударних навантажень. Крім того, за рахунок застосування компонентів поліолефінів, змінюється в'язкість розтопу, і стає можливим управляти технологічними властивостями сумішей, їх деформаційно-міцнісними характеристиками [2–5]. Модифікуючий ефект при сумісності з ПА6 значно посилюється завдяки функціоналізації поліолефінів шляхом прив'язки до їх макромолекул активних функціональних груп, які здатні до фізико-хімічної взаємодії з функціональними групами ПА6 і формування міцних зв'язків на межі розділу фази [6].

Агломерація є однією з перспективних технологій переробки поліамідних відходів, яка дозволяє відновити або навіть покращити деякі властивості матеріалу. Проте, більшість агломератів, одержаних з відходів ПА6, демонструють знижені властивості порівняно з первинним полімером: погіршення міцності, зниження молекулярної маси, підвищену гігроскопічність, неоднорідну морфологію. Це обмежує сфери застосування повторно переробленого матеріалу.

У зв'язку з цим актуальним є пошук методів модифікації агломератів із відходів ПА6 для підвищення їх механічних, термічних та експлуатаційних характеристик. Сучасні підходи включають армування скловолокном, вуглецевими волокнами, введення компабілізаторів, використання натуральних наповнювачів, а також створення біоінс-

пірованих структур. Саме тому огляд спрямований на систематизацію результатів досліджень, присвячених підвищенню властивостей таких агломератів, є дуже актуальним.

Мета статті – аналіз сучасних підходів до підвищення експлуатаційних характеристик агломератів з відходів ПА6 при модифікації функціональними наповнювачами та мастербатчами.

Матеріали та методи. Для формування огляду було проаналізовані наукові статті, що стосуються підвищення механічних, термічних та структурних властивостей вторинного ПА6. Огляд структуровано за основними підходами до модифікації агломератів: механічне армування, використання наповнювачів, застосування модифікаторів адгезії та створення біоінспірованих структур.

Об'єктами експериментального дослідження з підвищення міцностних характеристик агломерату ПА6 були:

- агломерат відходів поліаміду-6 від поліамідних виробів одягу, колготок, шкарпеток тощо (Material Wizard, Україна). Властивості агломерату відходів ПА6 були наступними: густина 1,05 г/см³ та індекс плинності розтопу (MFI) (230 °C, 2,16 кг) – 2,56 г/10 хв;

- мастербатч для поліамідів MW-PA CB10 (Material Wizard, Україна). MW-PA CB10 виготовлений на поліамідній основі та призначений для ефективного фарбування литих поліамідів 6, 66 та композицій на їх основі без зниження міцнісних властивостей.;

- гумінові речовини, які були отримані шляхом видобутку бурого вугілля [16].

Дослідження ударної в'язкості та руйнівної напруги при вигині модифікованого агломерату відходів ПА6 без надрізу за температури 20 °C проводилося на маятниковому копрі згідно з ISO 180 та ISO 178 відповідно.

Результати. Класифіковано методи підвищення експлуатаційних характеристик агломератів з відходів ПА6 за п'ятьма напрямками:

- механічна переробка (мелення, термоформування, повторна екструзія);
- армування різними типами волокон: скловолокном, вуглецевими волокнами та натуральними волокнами;
- модифікація наповнювачами та компабілізаторами;
- інноваційні підходи: біоінспіровані та самовідновлювальні структури;
- аналіз термомеханічних характеристик після багаторазового циклу обробки.

Опишемо механічну переробку та агломерацію відходів ПА6. Агломерація подрібнених відходів ПА6 зазвичай виконується методом екструзії з подальшим пресуванням або грануляцією. Проте вже після першого циклу переробки спостерігається падіння молекулярної маси та погіршення в'язко-еластичних властивостей [6–8]. Згідно з [6], після шести циклів екструзії агломератів ПА6 спостерігалось зниження показника тягучості на 25 %, але ударна в'язкість та модуль залишалися в межах допустимих значень для технічного застосування. Робота [7] виявила, що при включенні до 15 % повторно меленого поліаміду у композицію з первинним ПА6, можна зберегти рівень міцності вище 80 % від первісного зразка, особливо за умови додаткової сушки або вакуумного сушіння перед переробкою.

Таким чином, метод використання відходів ПА6 при агломерації може бути використаний шляхом додавання наповнювачів у композитах за умови контролю вологості та морфології.

Не менш важливим методом підвищення експлуатаційних характеристик агломератів з відходів ПА є армування різними типами армуючих волокон. Широко використовують вуглецеві волокна для підсилення міцнісних характеристик відходів ПА6. У [8] автори отримали композити на основі агломерату відходів ПА6 із 10 % мас. коротких вуглецевих волокон, у яких міцність на розтяг зросла на 21 %, а модуль пружності – на 32 % порівняно з немодифікованим агломератом. Згідно з [9], при використанні нетканих структур із переплетених вуглецевих волокон можна досягти рівномірного розподілу армувального компонента в агломераті ПА6.

Однак, для всіх систем ПА6-вуглецеві волокна спостерігається проблема із сумісністю фаз – недостатнє зчеплення між агломератом ПА6 і вуглецевими волокнами через втрату активних кінцевих груп у відходах ПА6 після рециклінгу.

Модифікація агломератів ПА6 з застосуванням скловолокон широко застосовується в автомобільній галузі для виготовлення технічних деталей. Дослідження [10] показало, що модифікація агломератів ПА6 30 % мас. скловолокна дозволяє відновити міцність до рівня первинного ПА6 на рівні понад 65 МПа, хоча подовження при розриві знижується на ~30 %.

Недавні дослідження [11, 12] засвідчили можливість використання рослинних волокон (льону, коноплі та целюлози) як дешевої та екологічної альтернативи синтетичним волокнам при одержанні армованих агломератів ПА6. Введення до 20 % натурального волокна у агломерат відходів ПА6 підвищило модуль Юнга до +68 %, при цьому густина залишалась у межах 1,25–1,30 г/см³.

Для підвищення комплексу експлуатаційних характеристик агломерату ПА6 активно проводять його модифікацію наповнювачами та модифікуючими добавками. Застосування мінеральних та органічних наповнювачів дозволяє не тільки знизити вартість композитів на основі агломератів ПА6, але й покращити окремі характеристики, зокрема жорсткість та стабільність розмірів. У статті [13] було досліджено ефект додавання 10–30 % мас. рисового лушпиння до агломератів литого агломерату ПА6. При вмісті рисового лушпиння на рівні 30 % мас. модуль пружності збільшився на 25 %, хоча міцність на розтяг дещо знизилася. Інше дослідження [14] повідомляє, що введення 5 % деревинного борошна з LiCl знижує температуру топлення агломерату ПА6 на 3,6–7,2 °С, що сприяє кращій переробці матеріалу при нижчих температурах. Загалом, органічні наповнювачі позитивно впливають на жорсткість та технологічність агломератів ПА6, але потребують контролю розміру часток і вологості.

Однією з основних проблем при змішуванні агломератів відходів ПА 6 з іншими полімерними або волокнистими компонентами є низька адгезія між фазами. Для її покращення використовують компабілізатори – речовини, що знижують міжфазну напругу. У [15] описано використання епоксидвмісних поліедричних олігомерних силсесквіоксан частинок як компабілізаторів у агломератах відходів ПА6, модифікованих термопластичним еластомером. Такі нанодобавки сприяли стабілізації фазової структури та підвищенню ударної в'язкості на 30 % після багаторазової переробки. Вищевказане дослідження [7] доводить ефективність малеїн ангідридного графт-поліпропілену у складі агломерату відходів ПА6, модифікованих вторинним поліпропіленом та вуглецевими волокнами. Загалом, використання компабілізаторів в модифікації агломератів ПА6 є

критичним чинником успішної інтеграції агломератів ПА6 у багатокомпонентні композити.

Новим напрямом у модифікації агломератів відходів ПА6 є створення біоінспірованих структур. У [16] запропоновано використовувати архітектуру з «цеглинок» – блоків жорсткого пластику, з'єднаних гнучким полімерним зв'язком. При такому підході механічні характеристики композиції залишаються високими, тоді як варіації модуля знижуються майже на 90 %. Також у статті [17] описано поєднання агломерату ПА6 з фазою з самовідновлюваного полімеру на основі циклоолефінового кополімеру, що дозволяє ремонтувати мікротріщини термоактивацією.

Авторами даної статті було досліджена сумісна модифікація агломерату відходів ПА6 з використанням гумінових речовин бурого вугілля та мастербатча [18,19]. Вплив модифікації гуміновими речовинами на міцнісні властивості агломерату відходів ПА6 показано в табл. 1.

Таблиця 1 – Зміна міцностних властивостей при сумісній модифікації агломерату відходів ПА6 з використанням гумінових речовин бурого вугілля та мастербатча MW-PA CB10

Вміст гумінових речовин, % мас.	Ударна в'язкість, кДж/см ²	Руйнівна напруга при вигині, МПа
0	23,44134	115,3176
0,25	26,58933	120,3734
0,5	29,44134	125,3176
0,75	27,93881	122,1848
Вміст мастербатча MW-PA CB10 при постійному вмісті гумінових речовин 0,5 %мас., % мас.		
0	29,44134	125,3176
2	43,58933	126,3734
3,5	42,16655	92,89885
5	20,93881	98,18481

Завдяки модифікації агломерату відходів ПА6 гуміновими речовинами спостерігається підвищення міцнісних властивостей при оптимальному вмісті гумінових речовин на рівні 0,5 % мас. Сумісна модифікація агломерату відходів ПА6, гуміновими речовинами при вмісті 0,5 % мас. в діапазоні вмісту MW-PA CB10 2–3,5 мас.% дозволяє значно покращити більшість міцнісних властивостей матеріалу. При подальшому збільшенні вмісту MW-PA CB10 спостерігається зниження рівня ударної в'язкості та руйнівної напруги при вигині.

Висновки. В рамках огляду показано, що агломерати з відходів ПА6 демонструють значне зниження властивостей при повторній переробці, однак ці властивості можуть бути ефективно компенсовані за допомогою армування, введення компабілізаторів або біоінсперована модифікація. Найкращі результати з методів модифікації агломератів ПА6 досягнуто при використанні коротких вуглецевих волокон з компабілізаторами, натуральних волокон для екологічно чистих композитів, нанодобавок і реак-

тивних сумішей для стабілізації фаз та біоінспірованих структур відкриваються перспективи для створення матеріалів із низькою варіативністю та стабільними експлуатаційними характеристиками.

Розглянуто авторський метод модифікації агломерату відходів ПА6 гуміновими речовинами та мастербатчем. Встановлено, що найкращим є агломерат відходів ПА6 зі вмістом гумінових речовин на рівні 0,5 % мас. та мастербатчу MW-PA CB10 на рівні 2 % мас. Для цього складу ударна в'язкість становить 43,5 кДж/см² та руйнівна напруга при вигині – 126,4 МПа. Саме такий склад агломерату ПА6 можна рекомендувати для повторного використання в традиційних галузях первинного поліаміду-6 для отримання інженерно-технічної продукції.

Література

1. Utracki L. A. History of commercial polymer alloys and blends (from perspective of the patent literature). *Polym. Eng. Sci.* 1995. Vol. 35, No. 2. P. 352–417.
2. Jurkowski B., Pesetskii S. S. Functionalized polyolefins and aliphatic polyamide blends: interphase interactions, rheology, and high elastic properties of melts. *Polyolefin Blends*. New Jersey : Wiley and Sons Inc., Hoboken, 2008. Ch. 18. P. 527–555.
3. Sabu T., Groeninckx G. Reactive compatibilization of heterogeneous ethylene propylene rubber (EPM)/nylon 6 blends by the addition of compatibiliser precursor EPM-g-MA. *Polymer*. 1999. Vol. 40. P. 5799–5819.
4. Kelar K.B., Jurkowski B. Preparation of functionalised low-density polyethylene by reactive extrusion and its blend with polyamide 6. *Polymer*. 2000. Vol. 41, No. 3. P. 1055–1062.
5. Oderkert Y., Groeninckx G. Morphology development by reactive compatibilization and dynamic vulcanization of nylon 6/EPDM blends with a high rubber fraction. *Polymer*. 2002. Vol. 43, No. 8. P. 2219–2228.
6. Domingo G. D., Souza A.M.C. PA6/PA66/talc composite: effect of reprocessing on the structure and properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. Vol. 139, No. 13. P. 51869.
7. Ergun N., Oksuz M., Ekinci A. Enhancing mechanical and thermal performance of recycled PA6/PP blends: chain extension and carbon fiber reinforcement synergy. *Materials*. 2025. Vol. 18. P. 1027.
8. Georgiou D., Sun D., Liu X., Athanasiou C.E. Suppressing mechanical property variability in recycled plastics via bio-inspired design. *arXiv (Cornell University)*. 2025.
9. Cho B. G., Joshi S. R., Han J. H., Kim G. H., Park Y. B. Interphase strengthening of carbon fiber/polyamide 6 composites through mixture of sizing agent and reduced graphene oxide coating. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021. Vol. 149. P. 106521.
10. Hermassi N., Ejday M., Grohens Y., Guermazi N., Corre Y-M. Investigation on mechanical, physico-chemical and thermal properties of recycled polyamide 6 reinforced with continuous glass fibers. *Journal of Composite Materials*. 2024. Vol. 59, No. 8. P. 1013–1034.
11. Keskin O. Y., Dalmis R., Balci Kilic G., Seki Y., Koktas S. Extraction and characterization of cellulosic fiber from *Centaurea solstitialis* for composites. *Cellulose*. 2020. Vol. 27. P. 9963–9974.

12. Liao Z., Hu Y., Shen Y., Chen K., Qiu C., Yang J., Yang L. Investigation into the reinforcement modification of natural plant fibers and the sustainable development of thermoplastic natural plant fiber composites. *Polymers*. 2024. Vol. 16. P. 3568.
13. Hirçin B. Ş., Yörür H., Mengeloğlu F. Effects of filler type and content on the mechanical, morphological, and thermal properties of waste casting polyamide 6 (W-PA6G)-based wood plastic composites. *BioResources*. 2020. Vol. 16, No. 1. P. 655–668.
14. Abdullah N., Abdan K., Lee C. H., Roslim M. H. M., Radzuan M. N., Shafi A. R. Thermal properties of wood flour reinforced polyamide 6 biocomposites by twin screw extrusion. *Physical Sciences Reviews*. 2022. Vol. 8, No. 12. P. 5153–5164.
15. Yildirim R., Ullah M. S., Koçoğlu H., Ün M., Çakır N. Y., Demir G., Çetin D., Urtekin G., Özkoç G., Mert O., Kodal M. Effects of hybrid POSS nanoparticles on the properties of thermoplastic elastomer-toughened polyamide 6. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8, No. 49. P. 47034–47050.
16. Yu M., Wang M., Xu C., Zhong W., Wu H., Lei P., Huang Z., Fu R., Gucci F., Zhang D. Review of bioinspired composites for thermal energy storage: preparation, microstructures and properties. *J. Compos. Sci.* 2025. Vol. 9. P. 41.
17. Perin D., Dorigato A., Pegoretti A. Thermoplastic self-healing polymer blends for structural composites: development of polyamide 6 and cyclic olefinic copolymer blends. *Journal of Applied Polymer Science*. 2023. Vol. 140, No. 16.
18. Purys V., Lebedev V., Miroshnichenko D., Shestopalov O., Kariev A. Computer modeling of optimal chemical composition of modified polyamide waste agglomerate. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2024. Vol. 221.
19. Lebedev V., Cherkashyna M., Sokolova A., Purys V. Research of modified polyamide waste agglomerate: regulatory issues and technological features. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 988. P. 99–106.
20. Miroshnichenko D., Cherkashyna M., Sokolova A., Lebedev V., Purys V., Kariev A., Bogatyrenko S., Miroshnychenko M. Polyamide-poly lactide-humic substances biocomposites hybrid modification sustainable development technology. *Petroleum and Coal*. 2024. Vol. 66. P. 758–766.

Bibliography (transliterated)

1. Utracki L. A. History of commercial polymer alloys and blends (from perspective of the patent literature). *Polym. Eng. Sci.* 1995. Vol. 35, No. 2. P. 352–417.
2. Jurkowski B., Pesetskii S. S. Functionalized polyolefins and aliphatic polyamide blends: interphase interactions, rheology, and high elastic properties of melts. *Polyolefin Blends*. New Jersey : Wiley and Sons Inc., Hoboken, 2008. Ch. 18. P. 527–555.
3. Sabu T., Groeninckx G. Reactive compatibilization of heterogeneous ethylene propylene rubber (EPM)/nylon 6 blends by the addition of compatibiliser precursor EPM-g-MA. *Polymer*. 1999. Vol. 40. P. 5799–5819.
4. Kelar K. B., Jurkowski B. Preparation of functionalised low-density polyethylene by reactive extrusion and its blend with polyamide 6. *Polymer*. 2000. Vol. 41, No. 3. P. 1055–1062.
5. Oderkert Y., Groeninckx G. Morphology development by reactive compatibilization and dynamic vulcanization of nylon 6/EPDM blends with a high rubber fraction. *Polymer*. 2002. Vol. 43, No. 8. P. 2219–2228.

6. Domingo G. D., Souza A. M. C. PA6/PA66/talc composite: effect of reprocessing on the structure and properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. Vol. 139, No. 13. P. 51869.
7. Ergun N., Oksuz M., Ekinci A. Enhancing mechanical and thermal performance of recycled PA6/PP blends: chain extension and carbon fiber reinforcement synergy. *Materials*. 2025. Vol. 18. P. 1027.
8. Georgiou D., Sun D., Liu X., Athanasiou C.E. Suppressing mechanical property variability in recycled plastics via bio-inspired design. *arXiv (Cornell University)*. 2025.
9. Cho B. G., Joshi S. R., Han J. H., Kim G. H., Park Y. B. Interphase strengthening of carbon fiber/polyamide 6 composites through mixture of sizing agent and reduced graphene oxide coating. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021. Vol. 149. P. 106521.
10. Hermassi N., Ejday M., Grohens Y., Guermazi N., Corre Y-M. Investigation on mechanical, physico-chemical and thermal properties of recycled polyamide 6 reinforced with continuous glass fibers. *Journal of Composite Materials*. 2024. Vol. 59, No. 8. P. 1013–1034.
11. Keskin O. Y., Dalmis R., Balci Kilic G., Seki Y., Koktas S. Extraction and characterization of cellulosic fiber from *Centaurea solstitialis* for composites. *Cellulose*. 2020. Vol. 27. P. 9963–9974.
12. Liao Z., Hu Y., Shen Y., Chen K., Qiu C., Yang J., Yang L. Investigation into the reinforcement modification of natural plant fibers and the sustainable development of thermoplastic natural plant fiber composites. *Polymers*. 2024. Vol. 16. P. 3568.
13. Hirçin B. Ş., Yörür H., Mengeloğlu F. Effects of filler type and content on the mechanical, morphological, and thermal properties of waste casting polyamide 6 (W-PA6G)-based wood plastic composites. *BioResources*. 2020. Vol. 16, No. 1. P. 655–668.
14. Abdullah N., Abdan K., Lee C.H., Roslim M.H.M., Radzuan M.N., Shafi A.R. Thermal properties of wood flour reinforced polyamide 6 biocomposites by twin screw extrusion. *Physical Sciences Reviews*. 2022. Vol. 8, No. 12. P. 5153–5164.
15. Yildirim R., Ullah M. S., Koçoğlu H., Ün M., Çakır N.Y., Demir G., Çetin D., Urtekin G., Özkoç G., Mert O., Kodal M. Effects of hybrid POSS nanoparticles on the properties of thermoplastic elastomer-toughened polyamide 6. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8, No. 49. P. 47034–47050.
16. Yu M., Wang M., Xu C., Zhong W., Wu H., Lei P., Huang Z., Fu R., Gucci F., Zhang D. Review of bioinspired composites for thermal energy storage: preparation, microstructures and properties. *J. Compos. Sci.* 2025. Vol. 9. P. 41.
17. Perin D., Dorigato A., Pegoretti A. Thermoplastic self-healing polymer blends for structural composites: development of polyamide 6 and cyclic olefinic copolymer blends. *Journal of Applied Polymer Science*. 2023. Vol. 140, No. 16.
18. Purys V., Lebedev V., Miroshnichenko D., Shestopalov O., Kariev A. Computer modeling of optimal chemical composition of modified polyamide waste agglomerate. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2024. Vol. 221.
19. Lebedev V., Cherkashyna M., Sokolova A., Purys V. Research of modified polyamide waste agglomerate: regulatory issues and technological features. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 988. P. 99–106.
20. Miroshnichenko D., Cherkashyna M., Sokolova A., Lebedev V., Purys V., Kariev A., Bogatyrenko S., Miroshnychenko M. Polyamide-poly lactide-humic substances biocompo-

sites hybrid modification sustainable development technology. *Petroleum and Coal*. 2024. – Vol. 66. P. 758–766.

УДК 622.74

В. В. Пурис, аспірант, В. В. Лебедев, д-р техн. наук, доцент

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АГЛОМЕРАТІВ З ВІДХОДІВ ПОЛІАМІДІВ

Мета статті – аналіз сучасних підходів до підвищення експлуатаційних характеристик агломератів з відходів ПА6 при модифікації функціональними наповнювачами та мастербатчами. Показано, що сучасний період розвитку полімерного матеріалознавства характеризується підвищеним науковим і комерційним інтересом до сумішевих матеріалів на основі відходів ПА6 внаслідок практично необмежених можливостей швидкого та економічно вигідного розширення їх асортименту під конкретне застосування. Доведено, що агломерація є однією з перспективних технологій переробки поліамідних відходів, яка дозволяє відновити або навіть покращити деякі властивості матеріалу. Проте, більшість агломератів, одержаних з відходів ПА6, демонструють знижені властивості порівняно з первинним полімером: погіршення міцності, зниження молекулярної маси, підвищену гігроскопічність, неоднорідну морфологію. Це обмежує сфери застосування повторно переробленого матеріалу. В рамках огляду показано, що агломерати з відходів ПА6 демонструють значне зниження властивостей при повторній переробці, однак ці властивості можуть бути ефективно компенсовані за допомогою армування, введення компабілізаторів або біоінспірована модифікація. Найкращі результати з методів модифікації агломератів ПА6 досягнуто при використанні коротких вуглецевих волокон з компабілізаторами, натуральних волокон для екологічно чистих композитів, нанодобавок і реактивних сумішей для стабілізації фаз та біоінспірованих структур відкриваються перспективи для створення матеріалів із низькою варіативністю та стабільними експлуатаційними характеристиками. Розглянуто авторський метод модифікації агломерату відходів ПА6 гуміновими речовинами та мастербатчем. Встановлено, що найкращим є агломерат відходів ПА6 зі вмістом гумінових речовин на рівні 0,5 % мас. та мастербатчу MW-PA CB10 на рівні 2 % мас. Для цього складу ударна в'язкість становить 43,5 кДж/см² та руйнівна напруга при вигині – 126,4 МПа. Саме такий склад агломерату ПА6 можна рекомендувати для повторного використання в традиційних галузях первинного поліаміду-6 для отримання інженерно-технічної продукції.

Ключові слова: відходи, поліаміди, агломерат, підвищення, характеристик, міцність, методи.

V. V. Purys, V. V. Lebedev

MODERN APPROACHES TO IMPROVING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AGGLOMERATES FROM POLYAMIDE WASTE

The purpose of the article is to analyze modern approaches to improving the performance characteristics of agglomerates from PA6 waste when modified with functional fillers and masterbatches. It is shown that the modern period of development of polymer materials science is characterized by increased scientific and commercial interest in composite materials based on PA6 waste due to the practically unlimited possibilities of rapid and economically advantageous expansion of their range for specific applications. It is proven that agglomeration is one of the promising technologies for processing polyamide waste, which allows restoring or even improving some properties of the material. However, most agglomerates obtained from PA6 waste demonstrate reduced properties compared to the primary polymer: deterioration of strength, decrease in molecular weight, increased hygroscopicity, inhomogeneous morphology. This limits the scope of application of the recycled material. The review shows that agglomerates from PA6 waste demonstrate a significant decrease in properties during reprocessing, however, these properties can be effectively compensated by reinforcement, introduction of compatibilizers or bioinspired modification. The best results from the methods of modification of PA6 agglomerates were achieved when using short carbon fibers with compatibilizers, natural fibers for environmentally friendly composites, nanoadditives and reactive mixtures for phase stabilization, and bioinspired structures open up prospects for creating materials with low variability and stable performance characteristics. The author's method of modification of PA6 waste agglomerate with humic substances and masterbatch is considered. It was established that the best is the agglomerate of PA6 waste with a content of humic substances at the level of 0.5 wt. % and the masterbatch MW-PA CB10 at the level of 2 wt. %. For this composition, the impact strength is 43.5 kJ/cm² and the bending failure stress is 126.4 MPa. It is this composition of the PA6 agglomerate that can be recommended for reuse in traditional industries of primary polyamide-6 to obtain engineering products.

Keywords: waste, polyamides, agglomerate, improvement, characteristics, strength, methods.

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

3'2025

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 08.09.2025 р. Формат $60 \times 84 \frac{1}{8}$. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,2. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–20.
Зам. № . Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХПІ»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.