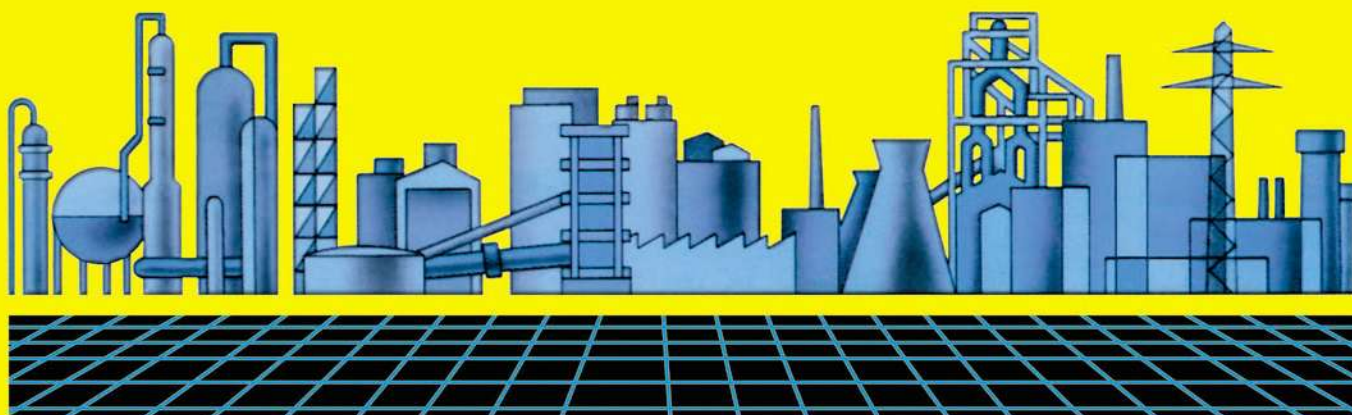


ІТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЩОКВАРТАЛЬНИЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ



ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

4'2025

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. Ведь, 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
üniversitet, Budapest, Magyarország
Шарифа Рафиди Ван Алви, PhD, professor, Малайзійський університет
технології
Девид Дж. Куккулька, PhD, професор, Державний університет Нью-
Йоркського коледжу у Буффало, США
Євген Кеніг, д-р техн. наук, професор, Падерборнський університет,
Германія
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;
зарєєстрований 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 ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

<i>Рябова І. Б., Селіхов Ю. А., Школьнікова Т. В., Пономаренко Г. В., Гарєв Л. А.</i> Перспективи застосування енергоефективних технологій кондиціонування повітря в Україні.....	3
---	---

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

<i>Поліщук М. Ю., Лебедєв В. В.</i> Дослідження екзотермії процесу структурування поліестерних ортофталевих олігомерів.....	19
<i>Пересьолков О. Р., Кунденко М. П., Круглякова О. В., Демчук Є. С.</i> Вимірювання дисперсного складу крапель у високошвидкісному газорідному потокі за пневматичною форсункою з використанням лічильно-імпульсного методу.....	28
<i>Пономаренко Є. Д., Миронов А. М., Соловей Л. В., Льченко М. В., Горбунов К. О., Биканов С. М., Краснокутський Є. В.</i> Інтеграція математичної моделі та RSM-оптимізації до методів планування експерименту у галузі хімічної інженерії із застосуванням сучасних інформаційних технологій.....	39

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<i>Сіробаба М. О., Карножицький П. В.</i> Вплив присадок на властивості нафтових бітумів: огляд сучасних досліджень.....	54
<i>Харченко М. О., Винников Ю. Л., Матяш О. В., Рибалко М. О.</i> Технологічні рішення підвищення продуктивності свердловин в карбонатних малопрониких пластах.....	66
<i>Лещенко С. А., Бровін О. Ю., Дерібо С. Г., Мадика І. Д., Водоріз О. С.</i> Дослідження технологічного процесу зносостійкого хромовання висококремнистого сплаву алюмінію.....	84
<i>Волошина І. М., Грецький І. О., Мокроусова О. Р., Хейломський Д. О.</i> Оптимізація параметрів відмивки бактеріальних клітин та тілець включення у виробництві рекомбінантного інсуліну людини.....	94
<i>Лігезін С. Л., Рябінін С. О., Федоренко О. Ю., Верещак В. О., Захаров А. В., Будьонний М. М.</i> Уніфікований утилізаційний кумулятивний заряд для гуманітарного розмінування територій.....	104

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

<i>Філенко О. М., Новожилова Т. Б., Байрачний В. Б., Тихомирова Т. С.</i> Формування екологічної культури у студентів при дистанційному форматі навчання.....	117
<i>Кочетов М. С., Черкашина Г. М.</i> Дослідження екологічно безпечних біополімерних композитів на основі термопластичного біопластику та відпрацьованої кавової гущі.....	125

<i>Сторінка редколегії.....</i>	135
---------------------------------	-----

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 12 від 27.11.2025 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження : щоквартальний науково-практичний журнал / Нац.
техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. – № 4. – 136 с.

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

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2025

І. Б. Рябова, канд. техн. наук, професор, Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор,
Т. В. Школьнікова, канд. техн. наук, доцент,
Г. В. Пономаренко, канд. техн. наук, доцент, Л. А. Гарєв, аспірант

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: системи кондиціювання повітря, зрошувані насадки, випарне охолодження, термодинамічна ефективність, термогідродинамічні характеристики, інтенсифікація процесів тепло- та масообміну.

Починаючи з другої половини ХХ століття, системи кондиціювання повітря набули широкого поширення для створення комфортних мікрокліматичних умов у житлових, громадських та виробничих будівлях. Основною метою кондиціювання є підтримання заданих параметрів повітря – насамперед температури та відносної вологості – відповідно до санітарно-гігієнічних і технологічних вимог. За даними Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), на потреби охолодження повітря нині припадає близько 10 % світового споживання електроенергії, причому ця частка має стійку тенденцію до зростання [1]. У ряді регіонів із жарким кліматом, а також у промислових і громадських будівлях, частка енергії, що витрачається на охолодження, може сягати 20–30 % від загального енергоспоживання. Таким чином, ефективність систем кондиціювання безпосередньо впливає на енергетичний баланс як окремих підприємств, так і цілих енергосистем. Сучасні тенденції кліматичних змін, зокрема підвищення середньорічної температури та частоти екстремальних теплових періодів, призводять до постійного зростання попиту на холод у побутовому, комерційному та промисловому секторах.

З іншого боку, фундаментом для створення конкурентоспроможної економіки є зниження енергоемності виробництва та скорочення питомих витрат енергії на одиницю продукції. Для України це завдання набуло особливої актуальності в умовах повномасштабного вторгнення, втрати частини енергогенеруючих потужностей та зростання цін на енергоносії на світовому ринку.

З урахуванням того, що системи кондиціювання сьогодні активно впроваджуються не лише у житлових та офісних приміщеннях, а й у сферах агропромислового виробництва, зберігання сільськогосподарської продукції, фармацевтичної, харчової та мікроелектронної промисловості й т.і., надзвичайної важливості набуває пошук технологій, здатних забезпечити отримання охолодженого повітря з мінімальними енергетичними та екологічними витратами. Серед енергоефективних технологій кондиціювання значне місце посідають системи, що використовують випарне охолодження та відновлювальні джерела енергії.

Задоволення потреб кондиціювання повітря може здійснюватися двома принципово різними шляхами: шляхом нарощування обсягів споживання енергоресурсів або завдяки впровадженню нових, енергоефективних технологій охолодження.

Перший підхід, що базується на застосуванні традиційних компресійних чи абсорбційних холодильних машин, має екстенсивний характер, отже, подальше збільшення кількості таких установок неминуче призводить до пропорційного зростання енергоспоживання і, відповідно, навантаження на енергосистему.

Другий, альтернативний шлях розвитку систем кондиціювання, навпаки, відкриває широкий спектр технологічних рішень, серед яких провідне місце посідають методи зниження температури повітря за рахунок процесів випарного охолодження. Принцип їх дії ґрунтується на використанні фізичного процесу випаровування води, під час якого відбувається інтенсивне поглинання теплоти з навколишнього повітря та зниження його температури. Завдяки відсутності потреби у фазових переходах холодоагентів і компресорному стисканні, випарні системи характеризуються значно нижчими енергетичними витратами порівняно з традиційними холодильними машинами. Крім того, вони можуть ефективно поєднуватися з технологіями рекуперації теплоти, використання вторинних енергоресурсів та відновлюваних джерел енергії, що робить їх одним із найперспективніших напрямів розвитку сучасних систем кондиціювання повітря.

Кондиціонери повітря, що застосовують випаровування води для отримання охолодженого повітря, набувають дедалі ширшого практичного використання в різних галузях [2]. Залежно від способу організації процесу тепло- та масообміну між повітрям і водою, системи випарного охолодження поділяють на прямі, непрямі (опосередковані) та комбіновані (гібридні).

Системи прямого випарного охолодження (ПВО) широко застосовуються у житлових і промислових будівлях, а також в об'єктах аграрного призначення (тваринницькі приміщення, теплиці), де їхнє використання стрімко розширюється [3–8]. Такі системи характеризуються високою екологічністю [9], оскільки забезпечують охолодження без застосування хлор- та фторовмісних холодоагентів. Відмова від компресорного стиску холодоагенту знижує споживання електричної енергії порівняно з традиційними компресійними кондиціонерами, що, відповідно, веде до зменшення викидів парникових газів і усунення ризику руйнування озонового шару.

Термодинамічні основи випарного охолодження ґрунтуються на здатності повітря утримувати певну кількість водяної пари, максимальне значення якої при даному атмосферному тиску, як відомо, визначається виключно температурою.

Принцип дії систем ПВО базується на процесі **адіабатичного випаровування води**. Коли сухе повітря проходить через зволожувальну (випарну) насадку, його температура знижується, вологовміст зростає, а ентальпія повітря залишається сталою. Така зміна стану досягається за рахунок витрачання частини теплоти повітря на фазовий перехід води у водяну пару при контакті з вологою поверхнею насадки [10, 11].

На рис. 1, а представлено спрощену схему ПВО [12], основними компонентами якої є вентилятор, що подає потік теплого повітря в систему, та зрошувана випарна насадка. Насадка змочується водою за допомогою розподільної системи форсунок, що забезпечують рівномірне зрошення її контактної поверхні. Надлишки води потрапляють до збірної ємності, з якої відбувається повернення води в систему зрошення. Після проходження через канали зрошуваної насадки, повітря охолоджується і постачається до споживача. Таким чином, при контакті теплого повітря зі зрошеною поверхнею насадки, відбувається адіабатне насичення повітря вологою, його температура зни-

жується (в граничному випадку до температури вологого термометру). Рис. 1б ілюструє схему протікання процесу адіабатного охолодження повітря на психометричній діаграмі. Стан 1 відповідає параметрам зовнішнього повітря, що потрапляє до системи тепловологісної обробки, точка 2 – параметрам зволоженого охолодженого повітря на виході з насадки.

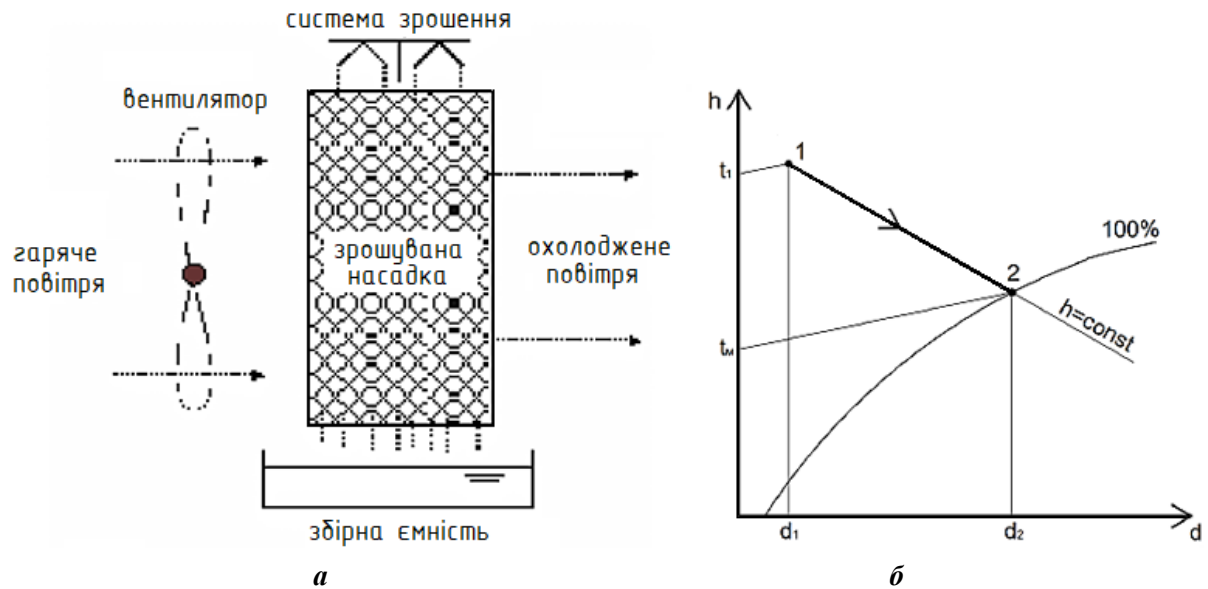


Рисунок 1 – Система прямого випарного охолодження:
а – принципова схема ПВО; б – схема процесу адіабатного охолодження повітря на психометричній діаграмі

Перевагою такого способу охолодження повітря є низьке енергоспоживання, оскільки електроенергія витрачається лише на привід вентилятора та насоса, що розподіляє воду по поверхні зрошуваної насадки; за рахунок цього економія енергії може досягати 70 % [24] порівняно з традиційними компресійними кондиціонерами, що працюють на холодоагентах. Однак область використання таких повітроохолоджувачів обмежена через те, що максимальна ефективність ПВО досягається лише у кліматі з відносною вологістю влітку близько 30 % [25] (так, наприклад, в місті Одеса в години з максимально високою температурою при використанні системи ПВО можна досягти зменшення температури $\approx 9^\circ\text{C}$).

Системи непрямого випарного охолодження повітря (НВО) працюють на основі спеціальних теплообмінників, які використовують приховану теплоту випаровування води для охолодження повітряного потоку без збільшення його вологості (рис. 2). Це дозволяє підтримувати оптимальні термодинамічні параметри в охолоджуваному середовищі. У останні роки такі системи стають все більш поширеними, оскільки забезпечують високу ефективність і мінімізують вплив кондиціонування повітря на навколишнє середовище [13, 14, 15].

В системах НВО процес отримання холоду шляхом використання психометричної різниці температур найпростішим чином реалізується в установках опосередкованого випарного охолодження повітря, де повітря охолоджується при контакті з сухою

поверхнею, яка з протилежного боку охолоджується водою, що випаровується. Для здійснення процесів перенесення теплоти й вологи при непрямо-випарному охолодженні повітря необхідна наявність двох потоків повітря:

- *корисного основного потоку*, теплота від якого відводиться конвективним шляхом через роздільну стінку теплообмінника, без безпосереднього контакту з водою. Це повітря охолоджується зі зменшенням його тепловмісту та подається в охолоджуване приміщення;

- *допоміжного потоку*, в якому відбувається випаровування води, що сприйняла теплоту від основного потоку через роздільну стінку. Процес у допоміжному потоці відбувається зі збільшенням вмісту вологи та тепловмісту повітря, тому таке повітря непридатне для охолодження приміщень і викидається назовні.

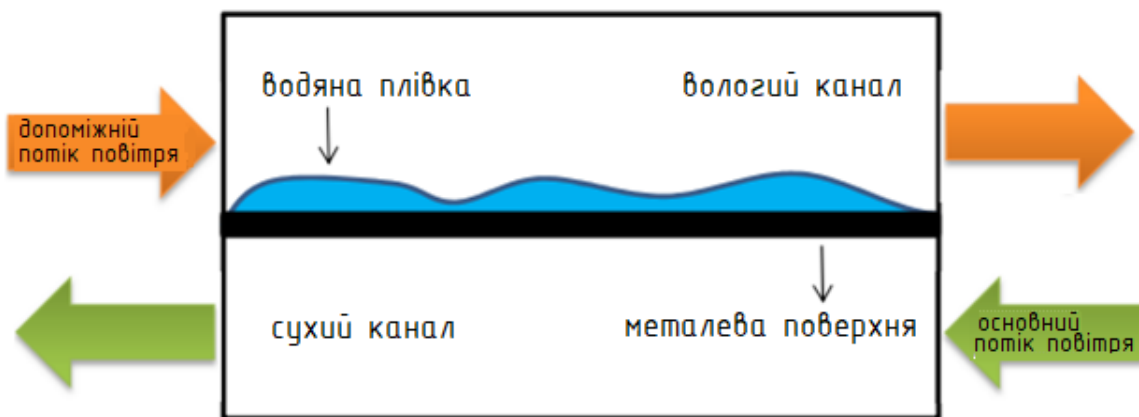


Рисунок 2 – Принципова схема НВО

Для визначення оптимального методу отримання холоду за рахунок термодинамічної нерівноваги атмосферного повітря в [16] розглядались процеси, що відбуваються при обтіканні потоком ненасиченого повітря пластини, одна із сторін якої суха, а протилежна сторона постійно перебуває у зволоженому стані. На рис. 3 зображено схему одного теплообмінного елемента при різних способах обтікання його повітряним потоком. При цьому вважається, що термічний опір пластини дорівнює нулю, поверхня пластини – нескінченна, а теплообмін із навколишнім середовищем відсутній. У разі паралельнопливного руху потоків (рис. 3а) теоретичною межею охолодження є температура мокрого термометра повітря, що охолоджується. На рис. 3б розглядається схема, коли повітря рухається, огинаючи пластину спочатку вздовж сухої поверхні, а потім – вздовж вологої. Повітря на виході з вологої сторони пластини набуває температури мокрого термометра, тобто відбувається адіабатне зволоження. Різниця температур між потоками спричиняє тепловий обмін від сухого до вологого потоку. Вода під час випаровування відбирає теплоту, охолоджуючи повітря на сухій стороні. При цьому сухий потік охолоджується до температури точки роси, а вологий – нагрівається і зволожується до параметрів, що відповідають температурі мокрого термометра повітря, яке входить на суху сторону пластини. Попри охолодження, повітря, що виходить із вологої сторони пластини, все ще має охолоджувальну здатність, яка визначається психрометричною різницею температур Δt . Повне її використання досягається при підігріві та одночасному зволоженні повітря до точки 3 ($t_1 = t_3$, $\phi = 1$). У такому разі питома

кількість теплоти, яку сприймає зворотний потік, стає більшою за рахунок кількості теплоти, що віддається прямим потоком. З теплового балансу випливає, що витрата зворотного потоку менша за прямий, тому частину охолодженого повітря можна використати корисно. Тоді схема змінюється так: охолоджене повітря після сухої поверхні пластини ділиться на корисний потік (у приміщення) та допоміжний (на вологу сторону пластини).

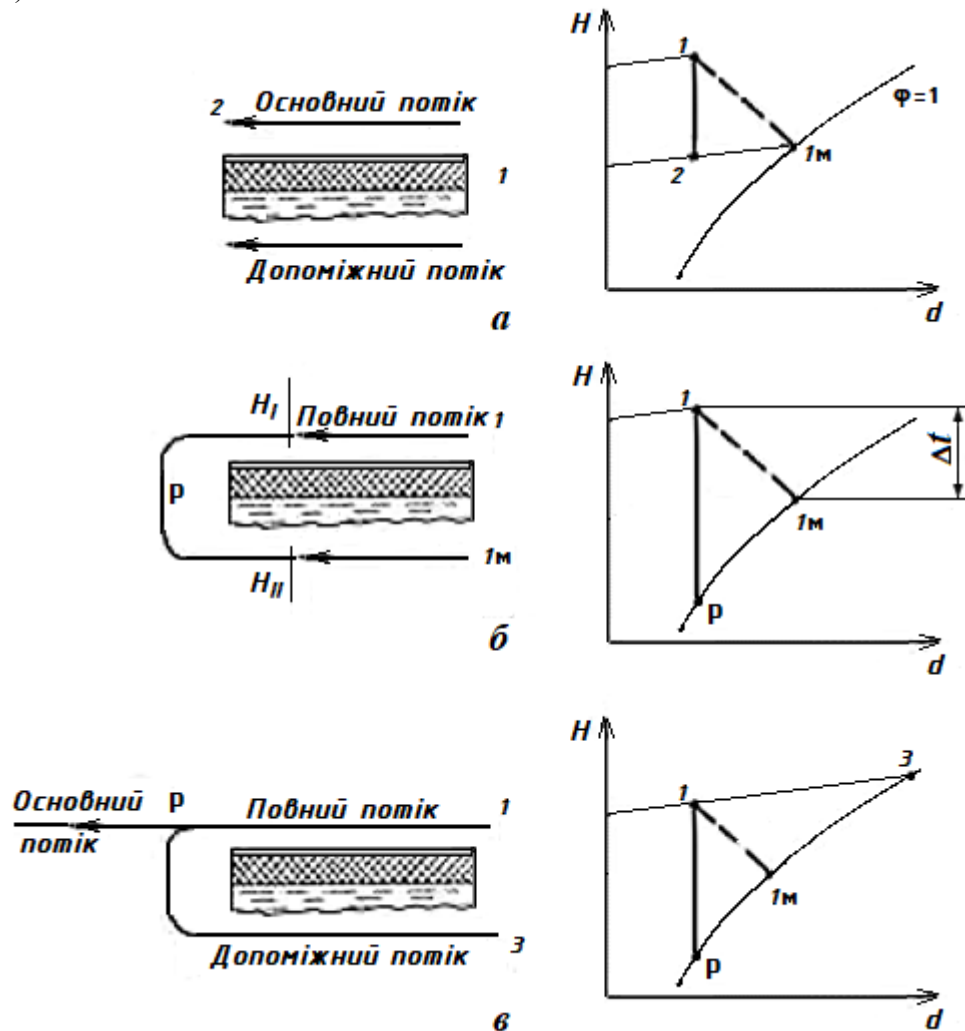


Рисунок 3 – Непряме випарне охолодження:

a – прямопливний рух основного й допоміжного потоків; *б* – протипливний рух основного й допоміжного потоків; *в* – розгалуження повного потоку повітря на сухий і вологий потоки

Також можливо застосовувати каскадну схему (рис. 4) [15], коли частина охолодженого по лінії постійного вологовмісту $d = \text{const}$ повітря використовується після його адіабатичного зволоження для наступного сухого охолодження частини повітря, що залишилася. При досить великій кількості ступеней і значних поверхнях тепло- і масообміну кінцева температура повітря, що охолоджується, може наблизитися до його температури точки роси на вході.

Отже, теоретично межею охолодження при НВО є температура точки роси повітря, що охолоджується.

До безумовних переваг систем кондиціювання повітря з випарним охолоджен-

ням належить суттєве зниження енергоспоживання – у три і більше разів порівняно з традиційними кондиціонерами, що використовують компресійні холодильні установки. Водночас ефективність кожної з таких систем має певні обмеження, переважно зумовлені кліматичними умовами регіону експлуатації, насамперед температурою та відотною вологістю зовнішнього повітря.

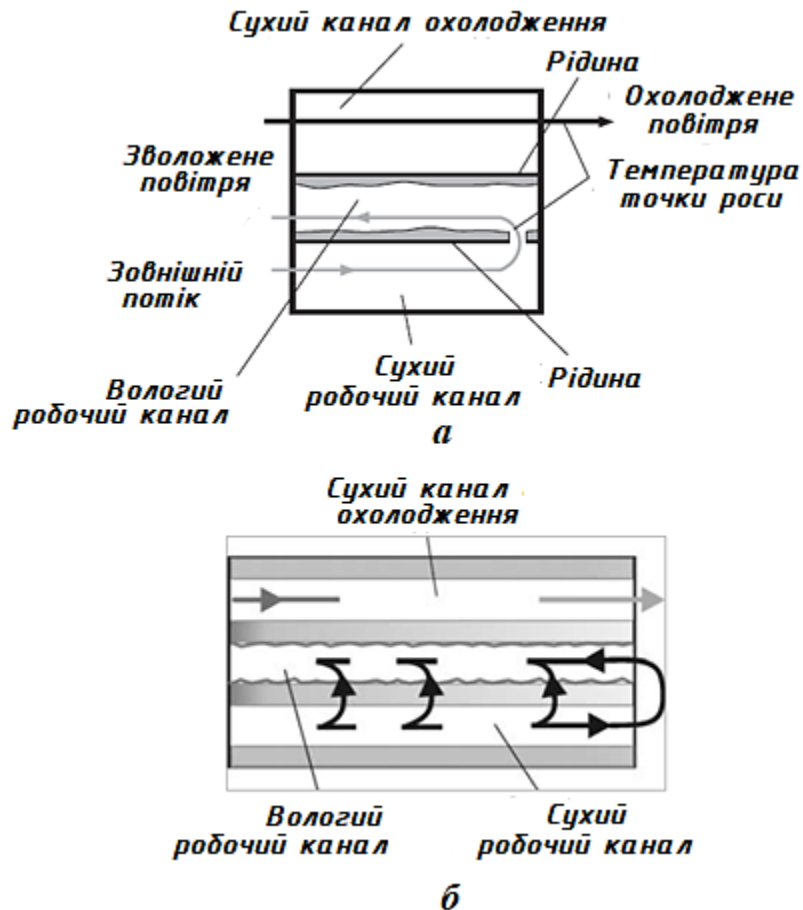


Рисунок 4 – Ділянка протиплинного тепломасообмінного апарата непрямого випарного охолодження:

а – схема з дискретною подачею охолодженого повітря; *б* – схема з безперервною подачею охолодженого повітря

Можливості застосування випарного охолодження повітря в Україні є досить широкими. З огляду на різноманіття кліматичних зон, наведених у табл. 1 [17], можна стверджувати, що потенціал використання систем кондиціонування з випарним охолодженням охоплює значну частину території країни. Водночас для кожної зони доцільно обирати оптимальний тип системи охолодження, враховуючи місцеві метеорологічні умови, рівень відносної вологості та температурні коливання протягом теплого періоду року.

Аналізуючи можливості застосування апаратів з випарного охолодження повітря слід зазначити, що апарати ПВО можуть бути ефективно використані в теплу пору року переважно в районах з посушливим або помірно континентальним кліматом, тобто у степовій частині України. Застосування даного виду кондиціонування повітря доцільне

на об'єктах агропромислового комплексу, де підтримання сталої відносної вологості повітря не є критичним – зокрема у теплицях, тваринницьких комплексах тощо).

В інших кліматичних зонах України більш ефективними є системи непрямого випарного охолодження (НВО). Для підвищення надійності та стабільності роботи систем кондиціонування доцільним є створення гібридних систем, у яких поєднуються переваги випарного охолодження з методами осушення повітря після його тепловологісної обробки.

Потенційні можливості випарного охолодження наведені в табл. 2 [18].

Таблиця 1– Кліматичні зони України

Кліматична зона	Регіон	Тип клімату	Відносна вологість влітку, %
Південна (суха степ)	Одещина Миколаївщина Херсонщина	Сухий степовий	35–55
Східна	Запоріжжя, Дніпро, Донецщина, Луганщина	Континентальний з помірною вологістю	40–60
Центральна	Київ, Вінниця, Черкаси, Кропивницький	Помірно континентальний	50–75
Північна	Житомир, Чернігів, Суми	Помірно вологий	60–75
Західна	Львів, Тернопіль, Івано-Франківськ	Вологий гірський	65–85
Карпати	Закарпаття, Чернівці	Гірський прохолодний	вище 70

Таблиця 2 – Параметри зовнішнього повітря та психрометрична різниця температур для деяких міст України (теплий період)

Місто	Параметри зовнішнього повітря							
	Б						В	
	t , °C	h , кДж/кг	d , г/кг	t_m , °C	d_m , г/кг	$t - t_m$, °C	t , °C	h , кДж/кг
Одеса	28,6	62,0	13,0	21,3	15,9	7,3	38	73,7
Херсон	30,6	61,6	12,0	21,2	15,2	9,4	39	74,6
Київ	28,7	56,1	10,6	19,6	14,3	9,1	39	70,8
Луганськ	31,8	58,7	10,4	20,3	15,0	11,5	40	66,2
Харків	29,4	56,1	10,3	19,6	14,3	9,8	39	76,3

Непряме випарне охолодження з використанням рідкого осушувача є перспектив-

вною альтернативою традиційним парокомпресійним системам кондиціонування, оскільки дає змогу одночасно розв'язати низку економічних, екологічних і регуляторних проблем. Такі системи поєднують два основних процеси обробки повітря: видалення вологи в осушувачі та відведення явного тепла в непрямому випарному охолоджувачі за М-циклом. Експериментальні дослідження показують, що зміна осушувальної здатності на першому ступені безпосередньо впливає на охолоджувальну ефективність другого ступеня. Підвищення температури або вологості повітря на вході, а також інтенсивності осушення, веде до зростання загальної продуктивності гібридної системи.

Отже, оцінка термодинамічної ефективності дозволяє встановити принципові межі енергоощадності систем кондиціонування. Проте реальні експлуатаційні показники визначаються також властивостями конструкційних матеріалів, що використовуються у тепломасообмінних апаратах. Розглянемо матеріали, які можуть бути застосовані для виготовлення таких пристроїв у системах з прямим та непрямим випарним охолодженням.

Для обох типів кондиціонерів використовуються теплообмінні поверхні, які можуть виготовлятися з різних матеріалів, доступних на місцевих ринках.

Для систем прямого випарного охолодження на початкових етапах розвитку галузі як матеріал теплообмінних елементів використовували гофровані паперові пластини, просочені фенолформальдегідними смолами для підвищення волого- та біостійкості. Згодом до переліку матеріалів, придатних для виготовлення теплообмінних поверхонь, долучилися полімерні матеріали та металеві пластини зі спеціальними гідрофільними або капілярно-активними покриттями, які забезпечують рівномірне змочування поверхні та підвищують ефективність процесів тепло- і масообміну [19, 20, 21].

Кожен із потенційних матеріалів має власні переваги та обмеження, які необхідно враховувати під час вибору конструкційних елементів тепломасообмінних пристроїв. Так перевагою *целюлозних насадок*, виготовлених з целюлозного волокна або переробленого паперу, часто з додаванням антигнільних та антимікробних компонентів, є висока водоутримувальна здатність, значна ефективність охолодження (приблизно 80–90 %) та екологічність завдяки біорозкладності матеріалу. Водночас до основних недоліків таких насадок належать необхідність періодичної заміни (у середньому кожні 1–3 роки), схильність до утворення біологічних забруднень (цвілі, слизу) та потреба у регулярному технічному обслуговуванні для запобігання деградації матеріалу.

Синтетичні решітки, виготовлені з термостійких полімерів (HDPE, PP, PVC, ABS) відзначаються підвищеною довговічністю (5–10 років і більше), стійкістю до ультрафіолетового випромінювання, дії хімічних реагентів і біологічних чинників (цвілі, бактерій), а також простотою очищення та обслуговування. Разом з тим, їх ефективність випарного охолодження є дещо нижчою, ніж у целюлозних насадок, а для забезпечення необхідного рівня зволоження такі матеріали вимагають підвищеної витрати води.

Композиційні матеріали (скловолокно, полістирол, метал) відзначаються високою міцністю, стійкістю до вологи та корозії, а також довговічністю у експлуатації. Разом із тим їх охолоджувальна здатність є нижчою порівняно з целюлозними або синтетичними насадками, що слід враховувати при виборі матеріалу для конкретних умов роботи системи.

Крім того, для підвищення стійкості теплообмінних поверхонь до мікробіологічного забруднення та засмічення застосовують спеціальні нанопокриття, зокрема срібло, оксид титану (TiO_2) та оксид кремнію (SiO_2), які забезпечують антибактеріальний ефект і покращують довговічність матеріалу.

Слід відзначити, що у країнах з низьким та середнім рівнем доходу вартість імпорту та доставки матеріалів може значно впливати на кінцеву ціну обладнання. Для зменшення цих витрат доцільно використовувати місцеві матеріали та ресурси виробництва [22].

До матеріалів для НВО висуваються специфічні вимоги, які визначаються особливостями теплофізичних процесів у каналах теплообмінників. Зокрема, внутрішня структура апарату передбачає наявність сухих та вологих каналів, розділених тонкою, але міцною мембраною або бар'єром. Матеріал повинен витримувати постійне зволоження в одному з каналів, зберігаючи при цьому форму, не піддаватися засміченню і забезпечувати стабільні параметри тепло- та масообміну. Крім того, пористість, гігроскопічність і стійкість до мікробного росту є критично важливими характеристиками, наявність яких визначає працездатність і надійність системи.

Оскільки для апаратів непрямого випарного охолодження використовуються матеріали, принципово подібні до тих, що застосовуються в апаратах прямого випарного охолодження, їхні переваги та обмеження, як правило, також мають схожий характер [23].

Так, наприклад, *целюлоза з просоченням* є найбільш дешевим матеріалом і забезпечує хорошу зрошеність поверхні. Але її довговічність дуже низька, а органічна структура схильна до утворення плісняви та розмноження бактерій, що обмежує використання лише для бюджетних варіантів систем.

Полімери з мікропористою структурою, подібно до попереднього випадку, мають ряд переваг: вони стійкі до вологи, біостійкі і характеризуються тривалим терміном експлуатації. Але складність виготовлення, низька теплопровідність та відносно висока вартість, порівняно з паперовими пластинами обмежує їхнє широке застосування.

Крім того використовуються *полімерні композити*, у яких між мембранами вводять наповнювач, що формує множину мікроканалів, здатних утримувати вологу з вологого боку теплообмінного каналу.

Спеціально оброблений *алюміній з анадотним або полімерним покриттям* (можна віднести до композиційних матеріалів) поєднує високу теплопровідність, міцність формування каналів і технологічність поверхні, але через вразливість до корозії без спеціального якісного захисного покриття область застосування таких матеріалів обмежена.

Скловолокно також є дуже стійким до мікробів і впливу вологи, проте низька теплопровідність та неможливість точного формування каналів обмежують його застосування в довгострокових промислових установках.

Серед перспективних і довговічних матеріалів розглядають пористу кераміку та металеві поверхні з гідрофільними покриттями, отриманими хімічним шляхом.

Таким чином, вибір матеріалу для виготовлення зрошених поверхонь визначається призначенням конкретного обладнання.

Розробка високотехнологічних матеріалів, позбавлених зазначених раніше недоліків, та дослідження нових матеріалів є важливою проблемою, вирішення якої за-

безпечить галузь надійними елементами для тепло-масообміну в апаратах ПВО та НВО і сприятиме підвищенню енергоефективності систем кондиціонування.

Вибір матеріалів і конструкційних рішень визначає не лише надійність апаратів, а й енергетичну та економічну ефективність систем. Виходячи з цього, доцільно розглянути напрямки застосування випарного охолодження, де його переваги будуть максимально реалізовані.

Перспективними напрямками застосування систем випарного охолодження повітря в Україні є:

- агропромисловий сектор: овочесховища та зерносховища (охолодження з одночасним зволоженням для запобігання пересушуванню продукції), теплиці, тваринницькі комплекси (зниження температури влітку, створення оптимального мікроклімату);
- комерційні та громадські об'єкти: склади, логістичні центри, спортивні споруди (зали, манежі), торговельні павільйони, ринки – особливо у південних регіонах України (Одеса, Херсон, Запоріжжя), де літо спекотне й сухе;
- енергетика та ІТ-сектор: серверні приміщення (як допоміжна система до традиційного кондиціонування для економії енергії у міжсезоння), електропідстанції, трансформаторні станції, де іноді застосовують випарне охолодження у вентиляційних системах.

Завдяки значній економії енергії при забезпеченні комфортних параметрів повітря системи випарного охолодження можуть бути обладнані автономними джерелами енергії. Для об'єктів сільського господарства, складів і приміщень великої площі доцільно передбачати використання сонячної енергії, що генерується безпосередньо на об'єкті, особливо з урахуванням сезонного характеру експлуатації таких систем.

В Україні задокументоване реальне впровадження випарного охолодження у системах кондиціонування: на пекарні Grupo Vimbo в Дніпрі встановлено шість двоступеневих установок Oхусom IntrCooll із сумарною подачею 84 000 м³/год свіжого охолодженого повітря та заявленою економією витрат порівняно з традиційним кондиціонуванням [26]. В агропромисловому секторі (птаківництво/свинарство) повітряне випарне охолодження є типовим рішенням: на українському ринку офіційно доступні системи Hog Slat (EVAP Systems, касети H2Pad) і відповідні сервісні матеріали, що підтверджує їх фактичне застосування на фермах в Україні, а також технологія RainMaker від Big Dutchman (pad cooling) як галузевий стандарт [27]. Випарні панелі Munters CELdek поширені у вітчизняних постачальників і застосовуються як елемент припливного адіабатичного охолодження (наявні позиції й специфікації на українських сайтах), що підтверджує доступність і використання компоновок на базі pad-media [28]. Окремі промислові підприємства також розглядають адіабатичне повітряне охолодження як захід з ресурсоефективності (EU4Environment/ЮНІДО, харчова промисловість), що демонструє інституційне схвалення підходу для локальних умов.

Однак, на сьогоднішній день потенціал застосування систем випарного охолодження повітря в Україні залишається реалізованим лише частково. Розширення масштабів їх впровадження на промислових та агропромислових підприємствах дозволить суттєво знизити пікові навантаження на енергетичну систему країни у спекотний період року та підвищити енергоефективність виробництв у цілому.

До того ж, публікації про використання систем випарного охолодження повітря всіх типів носять переважно рекламний характер без опису методів розрахунку та кон-

структивних особливостей даного обладнання.

Висновки

Використання систем випарного охолодження повітря є одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності систем кондиціонування. Енергетичний ефект від їх застосування може досягати 30–70 %, залежно від типу системи, кліматичних умов та режимів експлуатації. Разом із тим, для широкого впровадження цієї технології в Україні необхідно реалізувати низку пріоритетних заходів:

- створення та промислове виробництво високоефективних, корозійностійких і довговічних зрошуваних насадок, що сприятиме зниженню вартості обладнання та стимулюватиме його локальне впровадження.

- розробка інженерних методик проектування дозволить оптимізувати параметри систем і розширити сферу їх практичного використання.

- використання енергії відновлювальних джерел для живлення систем випарного охолодження забезпечить додаткове зниження навантаження на енергосистему в пікові літні періоди.

Реалізація зазначених напрямів дозволить забезпечити сталий розвиток технологій охолодження повітря, підвищити енергетичну незалежність та зменшити вуглецевий слід у секторі кліматотехніки України.

Література

1. Keeping cool in a hotter world is using more energy, making efficiency more important than ever. *IEA*. 2023 URL: <https://www.iea.org/commentaries/keeping-cool-in-a-hotter-world-is-using-more-energy-making-efficiency-more-important-than-ever>.

2. Laknizi A., Abdellaha A., Faqirb M., Essadiqib E., Dhimdici S. Performance characterization of a direct evaporative cooling pad based on pottery material. *International journal of sustainable engineering*. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1080/19397038.2019.1677800>.

3. Elattar H. F., Fouda A., Nada S. A. Performance Investigation of a Novel Solar Hybrid Air Conditioning and Humidification–Dehumidification Water Desalination System. *Desalination*. 2016. No. 382. P. 28–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.023>.

4. Davies P. A., Hossain A. K., Vasudevan P. Stand-alone Groundwater Desalination System Using Reverse Osmosis Combined with a Cooled Greenhouse for Use in Arid and Semi-arid Zones of India. *Desalination and Water Treatment*. 2009. No. 5(1–3). P. 223–234. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.520>.

5. Aljubury I. M. A., Ridha H. D. Enhancement of Evaporative Cooling System in a Greenhouse Using Geothermal Energy. *Renewable Energy*. 2017. No. 111. P. 321–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.080>.

6. Bishoyi D., Sudhakar K. Experimental Performance of a Direct Evaporative Cooler in Composite Climate of India. *Energy and Buildings*. 2017. No. 153. P. 190–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.014>.

7. Xu J., Li Y., Wang R. Z., Liu W., and Zhou P. Experimental Performance of Evaporative Cooling Pad Systems in Greenhouses in Humid Subtropical Climates. *Applied Energy*. 2015. No. 138. P. 291–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.061>.

8. Jiaoliao C., Yanwen C., Fang X., Haigen H., Qinglin A. Analysis and Optimization of the Fan-Pad Evaporative Cooling System for Greenhouses Based on CFD. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 2014, Article 712740. P. 1–8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/712740>.
9. Kovačević I., Sourbron M. The Numerical Model for Direct Evaporative Cooler. *Applied Thermal Engineering*. 2017. No. 113. P. 8–19. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2016.11.025](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.025).
10. Camargo J. R., Ebinuma C. D., Silveira J. L. Experimental Performance of a Direct Evaporative Cooler Operating during Summer in a Brazilian City. *International Journal of Refrigeration*. 2005. No. 28 (7). P. 1124–1132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.12.011>.
11. Sohani A., Sayyaadi H. Design and Retrofit Optimization of the Cellulose Evaporative Cooling Pad Systems at Diverse Climatic Conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2017. No. 123. P. 1396–1418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.120>.
12. Camargo J. R., Ebinuma C. D., Cardoso S. A mathematical model for direct evaporative cooling air conditioning system. *Revista de Engenharia Térmica*. 2003. No. 4(2). P. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.5380/ret.v2i2.3473>.
13. Caruana R., De Antonellis S., Marocco L., Guilizzoni M. Modeling of Indirect Evaporative Cooling Systems: A Review. *Fluids*. 2023. No. 8(11), 303 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids8110303>.
14. Цимерман А. Термодинамические основы косвенно-испарительного охлаждения воздуха. *Отопление. Водоснабжение. Вентиляция. Кондиционеры*. 2013. № 4-5. URL: https://www.truba.ua/library/art-termodynamicheskie_osnovy.
15. Халатов А. А., Карп І. М., Ісаков Б. В. Термодинамічний цикл Майсоценка і перспективи його застосування в Україні. *Вісник НАН України*. 2013. № 2. С. 38–49 DOI: <https://doi.org/10.15407/vism2013.02.039>.
16. Цимерман А. Б., Майсоценко В. С., Печерская И. М. Косвенно-испарительный воздухоохладитель нового типа. *Холодильная техника*. 1976. № 3. С. 12–17.
17. World Bank Climate Change Knowledge Portal. URL: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>.
18. Дем'яненко Ю. І., Дорошенко О. В., Гоголь М. І. Система кондиціювання повітря на основі випарного охолодження і відкритого абсорбційного циклу. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2020. № 1–2. С. 11–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v56i1-2.1824>.
19. Laknizi A., Mahdaoui M., Abdellah A. B., Anoune K., Bakhouya M., Ezbakhe H. Performance Analysis and Optimal Parameters of a Direct Evaporative Pad Cooling System under the Climate Conditions of Morocco. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. No. 13. P. 100362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.11.013>.
20. Tilahun S. W. Feasibility and Economic Evaluation of Low-cost Evaporative Cooling System in Fruit and Vegetables Storage. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*. 2010. No. 10(8). DOI: <https://doi.org/10.4314/ajfand.v10i8.60885>.
21. Ndukwu M. C., Manuwa S. I. Review of Research and Application of Evaporative Cooling in Preservation of Fresh Agricultural Produce. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2014. No. 7(5). P. 85–102. DOI: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20140705.010>.

22. Abohorlu Doğramacı P., Riffat S., Gan G., Aydın D. Experimental Study of the Potential of Eucalyptus Fibres for Evaporative Cooling. *Renewable Energy*. 2019. No. 131. P. 250–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.005>.
23. Uzair S., Naseem A., Khalid H. A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021. No. 122. Vol. 105140. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0735193321000348>.
24. Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering. *Sustainable Cooling Technology Heats Up*. 2023. URL: <https://wyss.harvard.edu/news/sustainable-cooling-technology-heats-up>.
25. Guanchao Lv, Xu Ji, Bianfeng Yang, Yingxu Chen, Haiyang Xu. Operating modes study of evaporative cooling-dehumidification air conditioning under different climatic conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2024. No. 243, Vol. 122597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122597>.
26. What is the payback time of adiabatic cooling? URL: <https://www.oxycom.com/blog-news/how-quickly-do-you-earn-back-the-costs-of-adiabatic-cooling>.
27. Система випарного охолодження EVAP. URL: <https://www.hogslat.com.ua/systema-vyparnoho-okholodzhennya-evap>.
28. ТОВ «ВАДА». URL: <https://vada.ua/munters-panel-okholodzhennya-celdek-7090-15-1-2960610>.

Bibliography (transliterated)

1. Keeping cool in a hotter world is using more energy, making efficiency more important than ever. *IEA*. 2023 URL: <https://www.iea.org/commentaries/keeping-cool-in-a-hotter-world-is-using-more-energy-making-efficiency-more-important-than-ever>.
2. Laknizi A., Abdellaha A., Faqirb M., Essadiqib E., Dhimdici S. Performance characterization of a direct evaporative cooling pad based on pottery material. *International journal of sustainable engineering*. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1080/19397038.2019.1677800>.
3. Elattar H. F., Fouda A., Nada S. A. Performance Investigation of a Novel Solar Hybrid Air Conditioning and Humidification–Dehumidification Water Desalination System. *Desalination*. 2016. No. 382. P. 28–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.023>.
4. Davies P. A., Hossain A. K., Vasudevan P. Stand-alone Groundwater Desalination System Using Reverse Osmosis Combined with a Cooled Greenhouse for Use in Arid and Semi-arid Zones of India. *Desalination and Water Treatment*. 2009. No. 5(1–3). P. 223–234. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.520>.
5. Aljubury I. M. A., Ridha H. D. Enhancement of Evaporative Cooling System in a Greenhouse Using Geothermal Energy. *Renewable Energy*. 2017. No. 111. P. 321–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.080>.
6. Bishoyi D., Sudhakar K. Experimental Performance of a Direct Evaporative Cooler in Composite Climate of India. *Energy and Buildings*. 2017. No. 153. P. 190–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.014>.
7. Xu J., Li Y., Wang R. Z., Liu W., and Zhou P. Experimental Performance of Evaporative Cooling Pad Systems in Greenhouses in Humid Subtropical Climates. *Applied Energy*.

2015. No. 138. P. 291–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.061>.

8. Jiaoliao C., Yanwen C., Fang X., Haigen H., Qinglin A. Analysis and Optimization of the Fan-Pad Evaporative Cooling System for Greenhouses Based on CFD. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 2014, Article 712740. P. 1–8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/712740>.

9. Kovačević I., Sourbron M. The Numerical Model for Direct Evaporative Cooler. *Applied Thermal Engineering*. 2017. No. 113. P. 8–19. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2016.11.025](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.025).

10. Camargo J. R., Ebinuma C. D., Silveira J. L. Experimental Performance of a Direct Evaporative Cooler Operating during Summer in a Brazilian City. *International Journal of Refrigeration*. 2005. No. 28 (7). P. 1124–1132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.12.011>.

11. Sohani A., Sayyaadi H. Design and Retrofit Optimization of the Cellulose Evaporative Cooling Pad Systems at Diverse Climatic Conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2017. No. 123. P. 1396–1418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.120>.

12. Camargo J. R., Ebinuma C. D., Cardoso S. A mathematical model for direct evaporative cooling air conditioning system. *Revista de Engenharia Térmica*. 2003. Vol. 2, No. 2. P. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.5380/reterm.v2i2.3473>.

13. Caruana R., De Antonellis S., Marocco L., Guilizzoni M. Modeling of Indirect Evaporative Cooling Systems: A Review. *Fluids*. 2023. No. 8(11), 303 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids8110303>.

14. Tsymerman A. Termodynamicheskiye osnovy kosvenno-isparitel'nogo okhlazhdeniya vozdukh. *Otoplenye. Vodosnabzhenie. Ventyliatsiya. Konditsionery*. 2013. No. 4–5. URL: https://www.truba.ua/library/art-termodinamicheskie_osnovy.

15. Khalatov A. A., Karp I. M., Isakov B. V. Termodynamichnyi tsykl Maisotsenka i perspektyvy yoho zastosuvannia v Ukraini. *Visnyk NAN Ukrainy*. 2013. No. 2. P. 38–49 DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2013.02.039>.

16. Tsymerman A. B., Maisotsenko V. S., Pecherskaia Y. M. Kosvenno-isparitel'nyy vozdukhokhladytel novoho typu. *Kholodylnaya tekhnika*. 1976. No. 3. P. 12–17.

17. World Bank Climate Change Knowledge Portal. URL: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>

18. Demianenko Yu. I., Doroshenko O. V., Hohol M. I. Systema kondytsiuvannia povitria na osnovi vyparnoho okholodzhennia i vidkrytoho absorbtivnoho tsykladu. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2020. No. 1–2. P. 11–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v56i1-2.1824>.

19. Laknizi A., Mahdaoui M., Abdellah A. B., Anoune K., Bakhouya M., Ezbakhe H. Performance Analysis and Optimal Parameters of a Direct Evaporative Pad Cooling System under the Climate Conditions of Morocco. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. No. 13. P. 100362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.11.013>.

20. Tilahun S. W. Feasibility and Economic Evaluation of Low-cost Evaporative Cooling System in Fruit and Vegetables Storage. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*. 2010. No. 10(8). DOI: <https://doi.org/10.4314/ajfand.v10i8.60885>.

21. Ndukwu M. C., Manuwa S. I. Review of Research and Application of Evaporative Cooling in Preservation of Fresh Agricultural Produce. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2014. No. 7(5). P. 85–102. DOI: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20140705.010>.

22. Abohorlu Doğramacı P., Riffat S., Gan G., Aydın D. Experimental Study of the Potential of Eucalyptus Fibres for Evaporative Cooling. *Renewable Energy*. 2019. No. 131. P. 250–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.005>.
23. Uzair S., Naseem A., Khalid H. A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021. No. 122. Vol. 105140. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0735193321000348>.
24. Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering. *Sustainable Cooling Technology Heats Up*. 2023. URL: <https://wyss.harvard.edu/news/sustainable-cooling-technology-heats-up>.
25. Guanchao Lv, Xu Ji, Bianfeng Yang, Yingxu Chen, Haiyang Xu. Operating modes study of evaporative cooling-dehumidification air conditioning under different climatic conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2024. No. 243, Vol. 122597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122597>.
26. What is the payback time of adiabatic cooling? URL: <https://www.oxycom.com/blog-news/how-quickly-do-you-earn-back-the-costs-of-adiabatic-cooling>.
27. Systema vyparnoho okholodzhennia EVAP. URL: <https://www.hogslat.com.ua/systema-vyparnoho-okholodzhennia-evap>.
28. TOV «VADA». URL: <https://vada.ua/munters-panel-okholodzhennia-celdek-7090-15-1-2960610>.

УДК 697.9: 620.9: 621.565.9

І. Б. Рябова, канд. техн. наук, професор, Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор,
Т. В. Школьнікова, канд. техн. наук, доцент,
Г. В. Пономаренко, канд. техн. наук, доцент, Л. А. Гарєв, аспірант

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ

Системи кондиціювання сьогодні активно впроваджуються не лише у житлових та офісних приміщеннях, а й у сферах агропромислового виробництва, зберігання сільськогосподарської продукції, фармацевтичної, харчової та мікроелектронної промисловості. Як відомо, на частку охолодження припадає до 10 % світового споживання електроенергії, а у промислових регіонах цей показник може сягати 30 %. Пошук технологій, здатних забезпечити отримання охолодженого повітря з мінімальними енергетичними та екологічними витратами є актуальною задачею, рішення якої набуває особливого значення в умовах повномасштабного вторгнення і теперішнього стану електрогенеруючої системи. Серед енергоефективних технологій кондиціювання значне місце посідають системи, що використовують випарне охолодження та відновлювальні джерела енергії.

Порівняно з традиційними компресійними і абсорбційними холодильними машинами, альтернативні системи, що базуються на процесах випарного охолодження, відрізняються низьким енергоспоживанням, екологічною безпечністю, простотою кон-

струкції та можливістю інтеграції з відновлювальними джерелами енергії. Розглянуто класифікацію систем випарного охолодження – прямі, непрямі та комбіновані – та особливості їхнього застосування в агропромисловому секторі, тепличних комплексах і виробничих приміщеннях. Окреслено перспективи використання зрошуваних насадок та матеріалів із високими термогідродинамічними характеристиками для інтенсифікації процесів тепло- та масообміну.

Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на оптимізацію конструкцій елементів теплообміну, пошук якісних вітчизняних матеріалів, удосконалення систем керування мікрокліматом і розробку енергоефективних рішень для умов України. Використання випарного охолодження розглядається як один із найперспективніших напрямів розвитку систем кондиціонування повітря, що поєднує енергозбереження, екологічну сталість та технологічну ефективність.

Ключові слова: системи кондиціонування повітря, зрошувані насадки, випарне охолодження, термодинамічна ефективність, термогідродинамічні характеристики, інтенсифікація процесів тепло- та масообміну.

I. B. Riabova, Yu. A. Selikhov, T. V. Shkolnikova, H. V. Ponomarenko, L. A. Hariev

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ENERGY-EFFICIENT AIR CONDITIONING TECHNOLOGIES IN UKRAINE

Air-conditioning systems are increasingly implemented not only in residential and office buildings but also across agro-industrial facilities, agricultural product storage, and the pharmaceutical, food, and microelectronics industries. It is well known that cooling processes account for up to 10 % of global electricity consumption, and in industrial regions, this figure can reach 30 %. Therefore, developing technologies that can deliver cooled air with minimal energy and environmental costs is a critical task especially under full-scale invasion and the unstable state of the national power generation system. Among energy-efficient air-conditioning technologies, systems based on evaporative cooling and renewable energy sources play a significant role.

Compared to traditional vapor-compression and absorption refrigeration systems, evaporative cooling technologies offer low energy consumption, environmental safety, simple design, and the ability to integrate with renewable energy sources. This paper reviews the classification of evaporative cooling systems – direct, indirect, and combined – and examines their application in the agro-industrial sector, greenhouse complexes, and industrial buildings. The study also highlights the potential of irrigated packings and materials with high thermohydrodynamic performance to enhance heat and mass transfer processes.

Further research should focus on optimizing heat exchange element designs, developing high-quality domestic materials, improving microclimate control systems, and designing energy-efficient solutions suited to Ukraine's conditions. Evaporative cooling is considered one of the most promising directions in the development of air-conditioning technologies, combining energy savings, environmental sustainability, and technological effectiveness.

Keywords: air-conditioning systems, wetted media, evaporative cooling, thermodynamic efficiency, thermohydrodynamic characteristics, heat and mass transfer intensification.

М. Ю. Поліщук, аспірант, В. В. Лебедєв, д-р техн. наук, професор

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКЗОТЕРМІЇ ПРОЦЕСУ СТРУКТУРУВАННЯ ПОЛІЕСТЕРНИХ ОРТОФТАЛЕВИХ ОЛІГОМЕРІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: екзотермія, поліестерні олігомери, ортофталеві, ініціатори, прискорювачі, процеси, структурування.

Вступ. Поліестерні олігомери (ПО), зокрема ортофталевого типу (ПОО), є невіддільною складовою сучасної хімічної промисловості та виробництва композиційних матеріалів [1, 2]. Вони використовуються у суднобудуванні, будівництві та ливарних технологіях завдяки їхній економічності та механічній стійкості. Дослідження властивостей ПОО має велике значення для промисловості тому, що для забезпечення конкурентоспроможності полімерних матеріалів, що випускаються, необхідно постійно поглиблювати, конкретизувати теоретичні знання не тільки про методи отримання сучасних високомолекулярних сполук, а й про взаємний вплив вихідних компонентів [3, 4]. Знання залежності аналітичних характеристик, що досліджуються у роботі, дозволить виробляти матеріали з кращими властивостями, ніж сучасні.

Процес перетворення рідкого олігомеру ПОО у твердий полімерний матеріал – структурування, є ключовим етапом виробництва, що відбувається шляхом вільнорадикальної полімеризації [5, 6]. Ця реакція є сильно екзотермічною, тобто супроводжується інтенсивним виділенням теплоти. Критично важливим для технологічного контролю є вивчення та управління екзотермічним піком процесів структурування ПОО. У більшості практичних застосувань при кімнатній температурі для ініціювання затвердіння використовується редокс-система, що складається з метилетилкетонпероксиду (МЕКП) як ініціатора та октоату кобальту як прискорювача [7, 8]. Октоат кобальту діє як прискорювач, каталізуючи розкладання ініціатора. Він знижує енергію активації для розпаду пероксиду, що дозволяє генерувати вільні радикали при низьких температурах [9, 10]. Таким чином, швидкість генерації радикалів і, як наслідок, швидкість виділення теплоти (екзотерма), безпосередньо залежать від концентрації ініціатора та прискорювача. Аналіз параметрів екзотермічного піку (температура, час та сумарна теплота) дозволяє не лише зрозуміти кінетику реакції, але й запобігти термічній деструкції та дефектам структурованих ПОО.

Актуальність представленої роботи обумовлена необхідністю пошуку шляхів оптимізації систем структурування ПОО.

Мета статті – дослідження екзотермії процесу структурування поліестерних ортофталевих олігомерів.

Матеріали та методи. Об'єктами експериментального дослідження були:

– ПОО марки ES-1060-2 (ESKIM KİMYA, Туречина) – це ненасичений поліестерний олігомер на основі ортофталевої кислоти, який використовується для лиття. Він є еластичним із середньою реакційною здатністю. Найпоширенішим використанням

цієї ПОО є виробництво різних композиційних матеріалів, зокрема склопластиків, кювет, раковин, кухонних стільниць, ніжок столів, гудзиків, прикрас тощо;

– як ініціатор застосовувалися перекис метилетилкетону (ПМЕК) марок LUPEROX K1 S та PROMOX P200TX. LUPEROX® K1 S (Arkema, Франція) – це пероксид метилетилкетону, який використовується для структурування ПОО за кімнатної температури і підвищеній температурі в поєднанні з кобальтовим прискорювачем, як альтернатива дибензоїлпероксид/амінного прискорювача. PROMOX P200TX S (Promo, Італія) – це пероксид метилетилкетону, який використовується для структурування ПОО за кімнатної температури і підвищеній температурі, флегматизована суміш без перекису фталатів;

– прискорювач структурування марки AKCOBALT 6% (Akra Aluminum, Туреччина) – розчин кобальтових солей органічних кислот у стиролі.

Зразки ПОО досліджуваних марок з різним вмістом ініціаторів та прискорювача отримували шляхом зважування розрахункової кількості компонентів на аналітичних терезах і ретельно перемішували. Далі композицію заливали в змащену форму до певної товщини для подальшого дослідження процесів екзотермії структурування на авторській установці. Визначали час гелеутворення та значення екзотермічного піку в композиціях.

Установка була зібрана на основі мікроконтролера ESP32. Був використаний терморезистор PT100 платиновий який має наступні характеристики: діапазон вимірюваних температур -20°C до $+500^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2,5^{\circ}\text{C}$), точність $\pm 0,3 - 0,8^{\circ}\text{C}$ (в діапазоні $0-450^{\circ}\text{C}$). Модуль перетворювач MAX31865, використовуються для підключення, обробки і передачі даних із терморезистора до мікроконтролера. За допомогою програмного забезпечення був записаний в пам'ять мікроконтролера csv файл з виміряними даними температури і відповідними часовими рамками (timestamp).

Для вивчення густини структурованих ПОО використано гідростатичний метод згідно ISO 1183-1 для вимірювання густини зразка полімеру об'ємом не менше 1 cm^3 .

Результати. Ненасичені поліестерні олігомери є продуктами поліконденсації багатоатомних спиртів (наприклад, пропіленгліколю), ненасичених двоосновних кислот (переважно малеїнової/фумарової) та ортофталевої кислоти (або її ангідриду). Останній компонент забезпечує базові фізико-механічні властивості та є причиною класифікації смоли як ортофталевої. Основою процесу структурування є кополімеризація ненасичених зв'язків ППО з мономерним розчинником, зазвичай стиролом. Ця реакція призводить до формування просторової сітчастої структури (зшивання). Виділення теплоти (екзотермія) пов'язане з різницею в енергії між подвійними зв'язками та утвореними одинарними зв'язками у зшитому полімері. Для ефективного та швидкого структурування ПОО при кімнатній температурі використовується двокомпонентна ініціююча система, яка функціонує за принципом редокс-каталізу.

Вимірювання екзотермічних параметрів є основним методом для кінетичного дослідження структурування ППО. За допомогою дослідження екзотермії процесу структурування визначаються такі важливі параметри [11, 12]:

- найвища температурас;
- час до максимальної температури, яка досягнута в матеріалі;
- час гелеутворення.

Загальновідомо, що чим швидше структурування ППО, тим меншим час їх гелеутворення. Це критичний показник для запобігання термічній деструкції та контролю усадки. Екзотермічний пік часто має автокаталітичну форму, що відображає прискорення.

рення реакції після досягнення гелі-точки (початок формування тривимірної сітки) та переходу реакції в дифузійний контроль.

Було досліджено вплив вмісту ініціатору та його тип на параметри екзотермії процесу структурування ППО. В таблиці 1 наведено основні рецептури досліджених ППО.

Таблиця 1 – Результати експериментального визначення інтегральної (загальної) кислотності поверхні КГ та термопластичного біопластику марки GEMABIO F

Композиція	Вміст ПОО, % мас.	Вміст ініціатору LUPEROX K1 S, % мас.	Вміст ініціатору PROMOX P200TX, % мас.	Вміст прискорювача АКСОВАЛТ 6%, % мас.
ПОО1	98,7	1,0	–	0,3
ПОО2	98,7	–	1,0	
ПОО3	97,7	2,0	–	
ПОО4	97,7	–	2,0	

Дослідження, проведені вченими [13], однозначно підтверджують, що концентрація та природа системи ініціатор -прискорювач є головним фактором, що контролює екзотерму процесу структурування ПОО.

На рис. 1–4 наведено характеристика екзотермії процесу структурування досліджених ПОО.

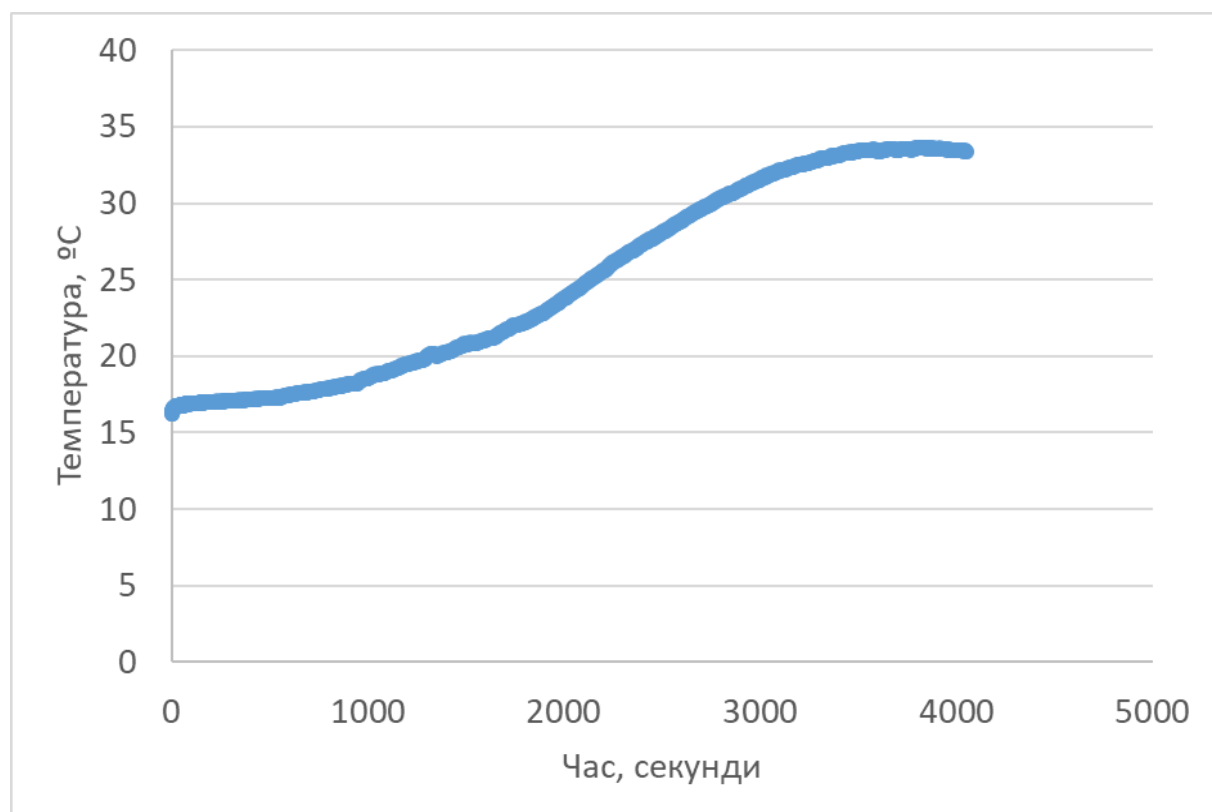


Рисунок 1 – Екзотермія процесу структурування композиції ПОО1

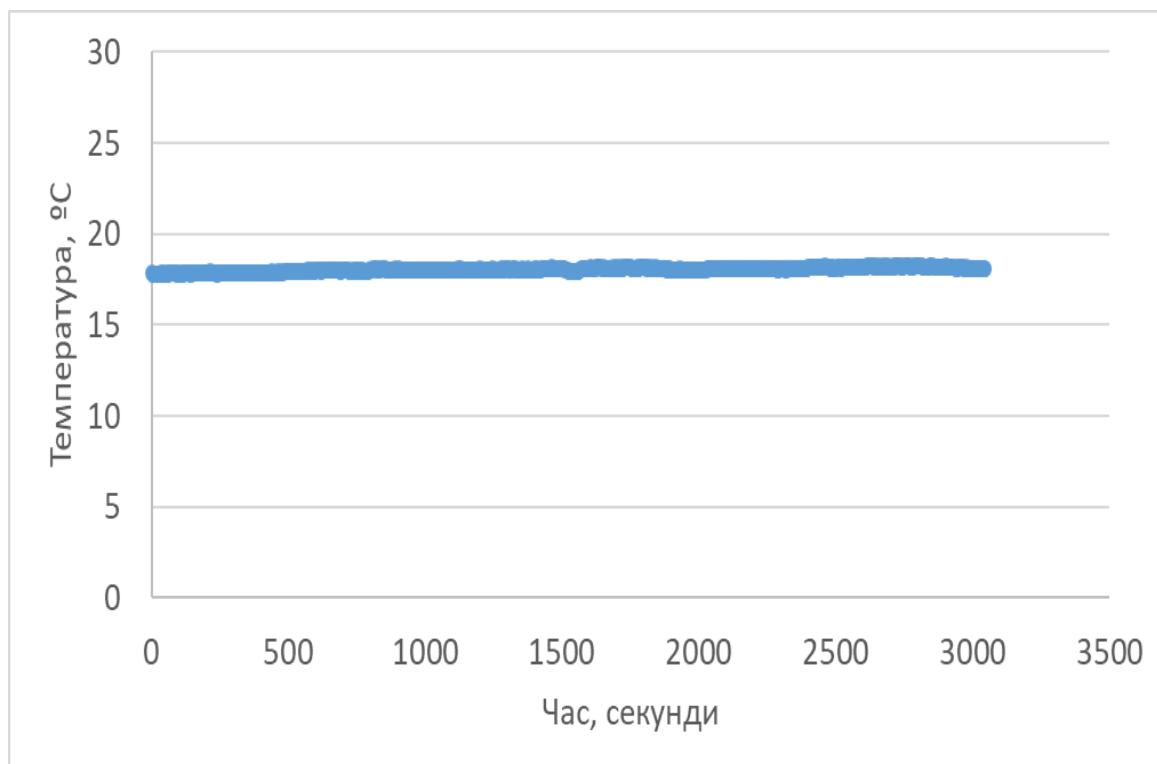


Рисунок 2 – Екзотермія процесу структуривання композиції ПОО2

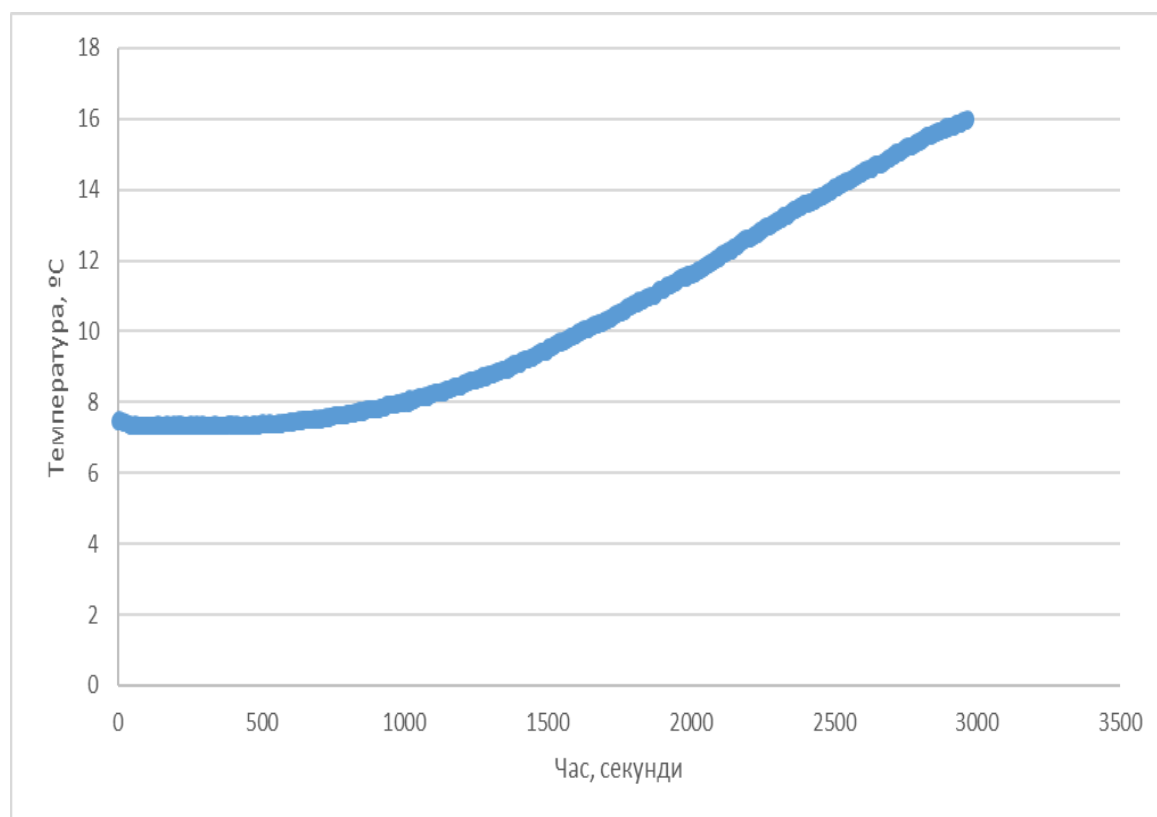


Рисунок 3 – Екзотермія процесу структуривання композиції ПОО3

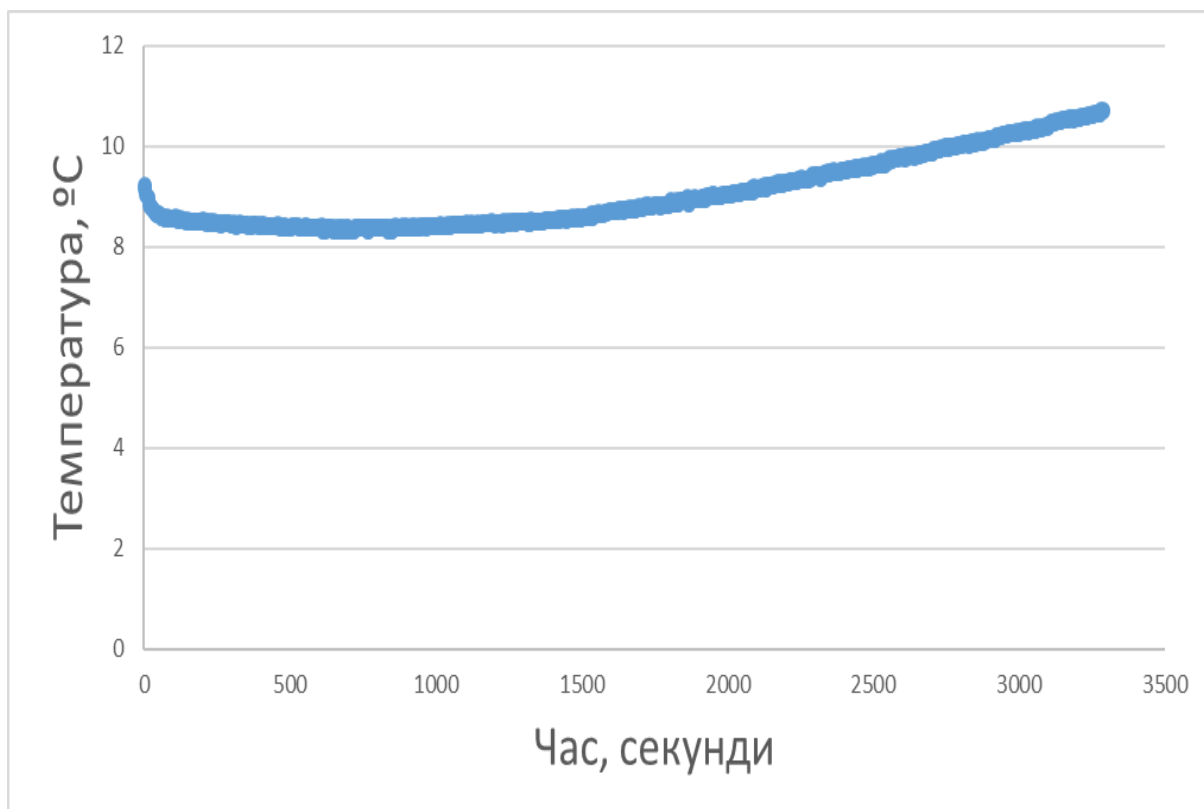


Рисунок 4 – Екзотермія процесу структуризації композиції ПОО4

З даних рисунків 1–4 видно, що для систем LUPEROX K1 S-AKCOBALT 6 % характерне наявність екзотермічного піку, який проявляється в часовому діапазоні структуризації 3500–4000 секунд ППО, зі збільшенням концентрації ініціатору з 1 до 2 % мас. відбувається зменшення екзотермічного перепаду з $\Delta 17^{\circ}\text{C}$ до $\Delta 9^{\circ}\text{C}$, відповідно. В той же час, застосування ініціатору PROMOX P200TX дозволяє значно зменшити рівень максимальної температури екзотермії процесу структуризації та дає змогу провести його без наявності екзотермічного піку. Фактично застосування ініціатору PROMOX P200TX дозволяє проводити процес структуризації при застосуванні прискорувача AKCOBALT 6 % в більш м'яких температурних умовах з достатньою швидкістю генерції радикалів, що забезпечує прискоренню реакцію та зменшення часу гелеутворення і збільшення густини структурованих ПОО (табл. 2).

Таблиця 2 – Характеристика показників структуризації досліджених композицій ПОО

Композиція	Час гелеутворення, хв.	Густина, г/см^3 .
ПОО1	22	1,225
ПОО2	13	1,257
ПОО3	23	1,251
ПОО4	15	1,266

Таким чином, в рамках дослідження екзотермії процесів структурування ПОО доведено ефективність застосування ініціатору PROMOX P200TX, який забезпечує рівномірність процесу.

Висновки. Екзотермічний пік є фундаментальною характеристикою процесу структурування ПОО, ініційованого системою МЕКП/октоат кобальту. Параметри цього піку безпосередньо відображають кінетику вільнорадикальної полімеризації, яка має яскраво виражений автокаталітичний характер. Необхідність уникнення надмірного підвищення температури структурування ПОО та неконтрольованої усадки вимагає точного технологічного контролю дозування прискорювача та ініціатора. Успішне виробництво композиційних матеріалів на основі ПОО базується на кінетичному моделюванні екзотермії, що дозволяє передбачити реакційну здатність суміші та забезпечити повну конверсію подвійних зв'язків при безпечній температурі.

В статті проведено дослідження екзотермії процесу структурування поліестерних ортофталевих олігомерів. Об'єктами експериментального дослідження були ПОО марки ES-1060-2 (ESKİM KİMYA, Туреччина), ініціатори застосовувалися перекис метилетилкетону (ПМЕК) марок LUPEROX K1 S та PROMOX P200TX. LUPEROX® K1 S (Arkema, Франція) та – прискорювач структурування марки AKCOBALT 6 % (Akra Aluminum, Туреччина). Було досліджено вплив вмісту ініціатору та його тип на параметри екзотермії процесу структурування ПОО. Було встановлено, що для систем LUPEROX K1 S-AKCOBALT 6 % характерне наявність екзотермічного піку, який проявляється в часовому діапазоні структурування 3500–4000 секунд ПОО, зі збільшенням концентрації ініціатору з 1 до 2 % мас. відбувається зменшення екзотермічного перепаду з $\Delta 17$ °C до $\Delta 9$ °C, відповідно. В той же час, застосування ініціатору PROMOX P200TX дозволяє значно зменшити рівень максимальної температури екзотермії процесу структурування та дає змогу провести його без наявності екзотермічного піку. Фактично застосування ініціатору PROMOX P200TX дозволяє проводити процес структурування при застосуванні прискорювача AKCOBALT 6 % в більш м'яких температурних умовах з достатньою швидкістю генерції радикалів, що забезпечує прискорену реакцію та зменшення часу гелеутворення і збільшення густини структурованих ПОО.

Література

1. Worzakowska M. Thermal analysis of polyesters containing oxirane groups. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2008. Vol. 93. P. 799–803.
2. Gieparda W., Rojewski S., Wüstenhagen S., Kicinska-Jakubowska A., Krombholz A. Chemical modification of natural fibres to epoxy laminate for lightweight constructions. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021. Vol. 140. P. 106171.
3. Li Q., Li Y., Chen Y., Wu Q., Wang S. An Effective Method for Preparation of Liquid Phosphoric Anhydride and Its Application in Flame Retardant Epoxy Resin. *Materials*. 2021. Vol.14. P. 2205.
4. Zhang M., Singh R.P. Mechanical reinforcement of unsaturated polyester by Al_2O_3 nanoparticles. *Materials Letters*. 2004. Vol. 58. P. 408–412.
5. Boyard N., Vayer M., Sinturel C., Seifert S., Erre R. Investigation of phase separation mechanisms of thermoset polymer blends by time-resolved SAXS. *European Polymer Journal*. 2005. Vol. 41. P. 1333–1341.
6. Penczek P., Czub P., Pielichowski J. Unsaturated polyester resins: Chemistry and technology. *Crosslinking in Materials Science*. 2005. P. 1–95.

7. Saleh H. E. Polyester. *BoD–Books on Demand: Norderstedt*. Germany. 2012.
8. Leroy E., Dupuy J., Maazouz A., Seytre G. Evolution of the coefficient of thermal expansion of a thermosetting polymer during cure reaction. *Polymer*. 2005. Vol. 46. P. 9919–9927.
9. Chatham C. A., Washington A. L. A framework for forming thermoset polymer networks during laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 72. P. 103620.
10. Liang Q., Feng X. P., Zhang K., Hui X. M., Hou X., Ye J. R. Effect of curing pressure on the curing behavior of an epoxy system: Curing kinetics and simulation verification. *Polymer*. 2022. Vol. 256. P. 125162.
11. Hsu C. P., Kinkelaar M., Hu P., Lee L. J. Effects of thermoplastic additives on the cure of unsaturated polyester resins. *Polymer Engineering and Science*. 1991. Vol. 31. P. 1450–1460.
12. Li W., Lee L. J. Low temperature cure of unsaturated polyester resins with thermoplastic additives. II. Structure formation and shrinkage control mechanism. *Polymer*. 2000. Vol. 41. P. 697–710.
13. Поліщук М. Ю., Лебедєв В. В. Особливості модифікації ненасичених поліестерних ортофталевих смол для склопластиків. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : матеріали XIX Міжнар.наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*. Харків. 2025. С. 593.
14. Barakat A., Al Ghazal M., Fono Tamo R. S., Phadatare A., Unser J., Hagan J., Vaidya U. Development of a Cure Model for Unsaturated Polyester Resin Systems Based on Processing Conditions. *Polymers*. 2024. Vol. 16. P. 2391.

Bibliography (transliterated)

1. Worzakowska M. Thermal analysis of polyesters containing oxirane groups. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2008. Vol. 93. P. 799–803.
2. Gieparda W., Rojewski S., Wüstenhagen S., Kicinska-Jakubowska A., Krombholz A. Chemical modification of natural fibres to epoxy laminate for lightweight constructions. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021. Vol. 140. P. 106171.
3. Li Q., Li Y., Chen Y., Wu Q., Wang S. An Effective Method for Preparation of Liquid Phosphoric Anhydride and Its Application in Flame Retardant Epoxy Resin. *Materials*. 2021. Vol.14. P. 2205.
4. Zhang M., Singh R.P. Mechanical reinforcement of unsaturated polyester by Al₂O₃ nanoparticles. *Materials Letters*. 2004. Vol. 58. P. 408–412.
5. Boyard N., Vayer M., Sinturel C., Seifert S., Erre R. Investigation of phase separation mechanisms of thermoset polymer blends by time-resolved SAXS. *European Polymer Journal*. 2005. Vol. 41. P. 1333–1341.
6. Penczek P., Czub P., Pielichowski J. Unsaturated polyester resins: Chemistry and technology. *Crosslinking in Materials Science*. 2005. P. 1–95.
7. Saleh H. E. Polyester. *BoD–Books on Demand: Norderstedt*. Germany. 2012.
8. Leroy E., Dupuy J., Maazouz A., Seytre G. Evolution of the coefficient of thermal expansion of a thermosetting polymer during cure reaction. *Polymer*. 2005. Vol. 46. P. 9919–9927.

9. Chatham C. A., Washington A. L. A framework for forming thermoset polymer networks during laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 72. P. 103620.

10. Liang Q., Feng X. P., Zhang K., Hui X. M., Hou X., Ye J. R. Effect of curing pressure on the curing behavior of an epoxy system: Curing kinetics and simulation verification. *Polymer*. 2022. T. 256. P. 125162.

11. Hsu C. P., Kinkelaar M., Hu P., Lee L. J. Effects of thermoplastic additives on the cure of unsaturated polyester resins. *Polymer Engineering and Science*. 1991. Vol. 31. P. 1450–1460.

12. Li W., Lee L. J. Low temperature cure of unsaturated polyester resins with thermoplastic additives. II. Structure formation and shrinkage control mechanism. *Polymer*. 2000. Vol. 41. P. 697–710.

13. Polishchuk M. Yu., Lebediev V. V. Osoblyvosti modifykatsii nenasychenykh poliesternykh ortohtalevykh smol dlia skloplastykiv. *Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh* : materialy XIX Mizhnar. nauk.-prakt. konf. mahistrantiv ta aspirantiv. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut». Kharkiv. 2025. P. 593.

14. Barakat A., Al Ghazal M., Fono Tamo R. S., Phadatare A., Unser J., Hagan J., Vaidya U. Development of a Cure Model for Unsaturated Polyester Resin Systems Based on Processing Conditions. *Polymers*. 2024. Vol. 16. P. 2391.

УДК 622.74

М. Ю. Поліщук, аспірант, В. В. Лебедев, д-р техн. наук, професор

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКЗОТЕРМІЇ ПРОЦЕСУ СТРУКТУРУВАННЯ ПОЛІЕСТЕРНИХ ОРТОФТАЛЕВИХ ОЛІГОМЕРІВ

Екзотермічний пік є фундаментальною характеристикою процесу структурування поліестерних ортофталевих олігомерів, ініційованого системою метилетилкетон/октоат кобальту. Параметри цього піку безпосередньо відображають кінетику вільнорадикальної полімеризації, яка має яскраво виражений автокаталітичний характер. Необхідність уникнення надмірного підвищення температури структурування поліестерних ортофталевих олігомерів та неконтрольованої усадки вимагає точного технологічного контролю дозування прискорювача та ініціатора. Успішне виробництво композиційних матеріалів на основі поліестерних ортофталевих олігомерів базується на кінетичному моделюванні екзотерми, що дозволяє передбачити реакційну здатність суміші та забезпечити повну конверсію подвійних зв'язків при безпечній температурі. В статті проведено дослідження екзотермії процесу структурування поліестерних ортофталевих олігомерів. Об'єктами експериментального дослідження були ПОО марки ES-1060-2 (ESKİM KİMYA, Туречина), ініціатори застосовувалися перекис метилетилкетону (ПМЕК) марок LUPEROX K1 S та PROMOX P200TX. LUPEROX® K1 S (Arkema, Франція) та – прискорювач структурування марки AKCOBALT 6 % (Akra Aluminum, Туречина). Було досліджено вплив вмісту ініціатора та його тип на параметри екзотермії процесу структурування ППО. Було встановлено, що для систем LUPEROX K1 S-AKCOBALT 6 % характерне наявність екзотермічного піку, який проявляється в часовому діапазоні структурування 3500–4000 секунд ППО, зі збільшенням концентрації ініціатора з 1 до 2 % мас. відбувається зменшення екзотермічного пере-

паду з $\Delta 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $\Delta 9\text{ }^{\circ}\text{C}$, відповідно. В той же час, застосування ініціатору PROMOX P200TX дозволяє значно зменшити рівень максимальної температури екзотермії процесу структурування та дає змогу провести його без наявності екзотермічного піку. Фактично застосування ініціатору PROMOX P200TX дозволяє проводити процес структурування при застосуванні прискорувача AKCOBALT 6 % в більш м'яких температурних умовах з достатньою швидкістю генерції радикалів, що забезпечує прискоренню реакцію та зменшення часу гелеутворення і збільшення густини структурованих поліестерних ортофталевих олігомерів.

Ключові слова: екзотермія, поліестерні олігомери, ортофталеві, ініціатори, прискорювачі, процеси, структурування.

M. Yu. Polishchuk, V. V. Lebedev

STUDY OF THE EXOTHERMIC PROCESS OF STRUCTURING POLYESTER ORTHOPHTHAL OLIGOMERS

The exothermic peak is a fundamental characteristic of the process of structuring polyester orthophthalic oligomers initiated by the methyl ethyl ketone/cobalt octoate system. The parameters of this peak directly reflect the kinetics of free-radical polymerization, which has a pronounced autocatalytic character. The need to avoid excessive temperature increase of structuring polyester orthophthalic oligomers and uncontrolled shrinkage requires precise technological control of the dosage of the accelerator and initiator. The successful production of composite materials based on polyester orthophthalic oligomers is based on kinetic modeling of the exotherm, which allows predicting the reactivity of the mixture and ensuring complete conversion of double bonds at a safe temperature. The article studies the exotherm of the structuring process of polyester orthophthalic oligomers. The objects of the experimental study were the ES-1060-2 POO (ESKİM KİMYA, Turkey), the initiators used were methyl ethyl ketone peroxide (MEKP) of the LUPEROX K1 S and PROMOX P200TX brands. LUPEROX® K1 S (Arkema, France) and the structuring accelerator AKCOBALT 6 % (Akpa Aluminum, Turkey). The influence of the initiator content and its type on the exotherm parameters of the structuring process of the PPO was investigated. It was found that the LUPEROX K1 S-AKCOBALT 6 % systems are characterized by the presence of an exothermic peak, which manifests itself in the structuring time range of 3500–4000 seconds of the PPO, with an increase in the initiator concentration from 1 to 2 % by mass. there is a decrease in the exothermic drop from $\Delta 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $\Delta 9\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. At the same time, the use of the PROMOX P200TX initiator allows to significantly reduce the level of the maximum exotherm temperature of the structuring process and allows it to be carried out without the occurrence of an exothermic peak. In fact, the use of the PROMOX P200TX initiator allows the structuring process to be carried out when using the AKCOBALT 6 % accelerator in milder temperature conditions with a sufficient rate of radical generation, which ensures an accelerated reaction and a reduction in the gelation time and an increase in the density of structured polyester orthophthalic oligomers.

Keywords: exotherm, polyester oligomers, orthophthalic, initiators, accelerators, processes, structuring.

О. Р. Пересьолков, канд. техн. наук, доцент, М. П. Кунденко, д-р техн. наук, професор,
О. В. Круглякова, канд. техн. наук, доцент, Є. С. Демчук, аспірант

**ВИМІРЮВАННЯ ДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ КРАПЕЛЬ
У ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ГАЗОРІДИННОМУ ПОТОЦІ
ЗА ПНЕВМАТИЧНОЮ ФОРСУНКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ
ЛІЧИЛЬНО-ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: диспергування рідини, лічильно-імпульсний метод, дисперсна структура, якість розпилювання, швидкість потоку, регулювання перепаду тиску, інтенсифікація процесів тепломасообміну.

На теплоенергетичних об'єктах різного призначення часто виникає необхідність у тонкому диспергуванні рідини, що здебільшого реалізується за допомогою пневматичних або парових форсунок. Так, ефективність процесу згоряння рідинних, а особливо, важких рідинних палив у компактних камерах суттєво залежить від ступеня їх диспергування, тобто від розміру крапель.

Якісне тонке розпилювання рідинного палива є доцільним у топках вогневих рекуператорів, випарних апаратах із зануреною камерою згорання, а також у газотурбінних двигунах.

Розпил рідини до мінімальних розмірів крапель використовують в контактних теплообмінних апаратах, де бажано забезпечити максимальне випаровування крапель диспергованої рідини, так як повторне її використання виключено. Такі умови мають місце в парових редукційно-охолоджувальних установках, у харчовій промисловості під час охолодження варених ковбас. Аналогічна проблема є в сталепрокатному виробництві під час змащування гарячекатаних смуг металу перед їх змотуванням.

У роботах [1, 2, 6] показано, що розміри крапель у газорідинних потоках, сформованих пневматичними форсунками, зазвичай лежать у межах 10–150 мкм. Розподіл крапель описують функціями Розіна-Раммлера, гамма- або логнормальними залежностями [5, 9]. У дослідженнях [4, 10, 11] застосовуються PDPA, дифракційні, голографічні та методи відеоаналізу, однак усі вони вимагають прозорого середовища та обмежені щільністю рідинної компоненти в потоці, швидкістю її руху, або є дуже трудомістким і не можуть бути використані для багаторазових системних досліджень.

В даній роботі для дослідження фракційного складу крапель в газорідинному потоці використовується лічильно-імпульсний метод, вперше представлений Віксом і Даклером [12] і вдосконалений в НТУ «ХПІ» на кафедрі загальної теплотехніки. Цей метод доцільно використовувати у полідисперсних газорідинних потоках в широкому діапазоні їх щільностей та швидкості руху.

Лічильно-імпульсний метод заснований на реєстрації та підрахунку числа електричних імпульсів струму h , що виникають під час замикання краплями кінців конічних електродів, відстань S між якими дискретно змінюється під час вимірювань (як показано на рис. 1). Тобто експериментально встановлюється залежність $h = f(S)$. На рис. 2 показані типові графіки залежностей $h = f(S)$, які отримані саме в специфічних умовах вимірювань у високошвидкісному газорідинному потоці після пневматичної

форсунки. Час вимірювання числа замикань краплями за відповідних зазорів був статистично обґрунтований для даних умов диспергування, параметрів електронної апаратури, частоти замикань, відстані від форсунки.

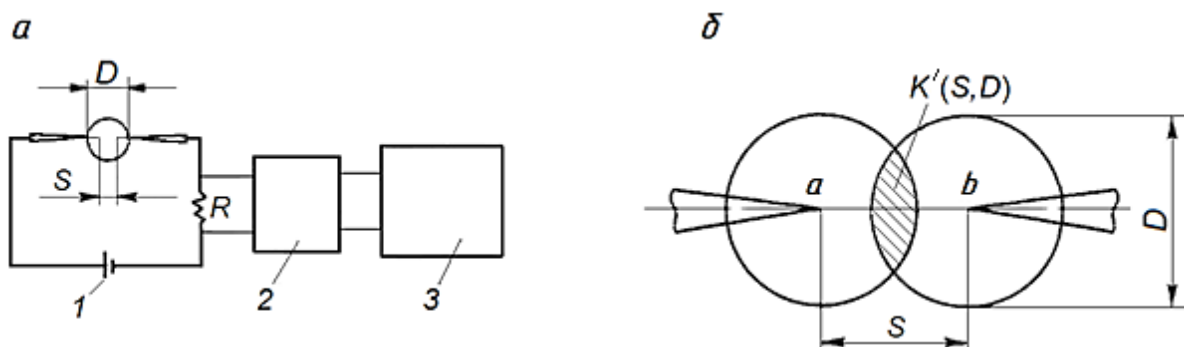


Рисунок 1 – Схема лічильно-імпульсного методу вимірювання розмірів крапель:

a – схема вимірювання частоти замикань:

1 – джерело живлення; 2 – формувач-підсилювач; 3 – електронний лічильник (частотомір)

б – контакт краплі з електродом

$K'(S, D)$ – площа, де знаходиться центр краплі діаметром D при відстані між електродами S , яка може торкнутися кінців електродів

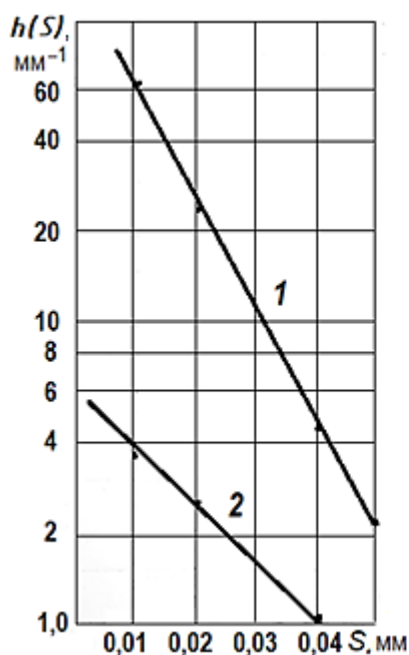


Рисунок 2 – Типові експериментальні залежності числа імпульсів струму h від відстані між кінцями електродів S

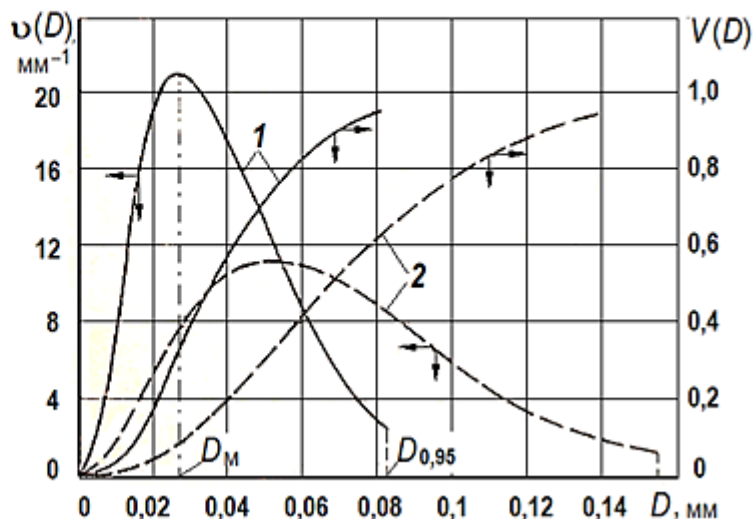


Рисунок 3 – Графіки ненормованих диференціальних $v(D)$ та інтегральних $V(D)$ функцій розподілення об'єму крапель за діаметром, розрахованих за експериментальними даними, показаними на рис. 2

Під час дослідження тонкості розпилу в дрібнодисперсному краплинному потоці вдавалося фіксувати частоту замикань краплями за мінімального зазору між кінцями електродів $S = 0,02$ мм. Для цього кінці електродів заточувалися електрогальванічним способом з радіусом при вершині не більше 1 мкм.

На підставі експериментальної залежності $h = f(S)$ розраховується параметр дисперсного складу α , 1/мм:

$$\alpha = \frac{\ln \frac{h(S_1)}{h(S_2)}}{S_2 - S_1}.$$

Цей параметр повністю характеризує в однопараметричній залежності (що є суттєвою перевагою лічильно-імпульсного методу) дисперсний склад крапель, у тому числі описує диференціальну функцію розподілу об'єму крапель за діаметрами як

$$v(D) = \frac{2}{3} \frac{\alpha^4}{\pi} D^3 K_1(\alpha D),$$

де K_1 – функція Бесселя другого роду, а також такі характеристики сукупності крапель як модальний діаметр крапель $D_m = 2,39/\alpha$, медіанний діаметр $D_{0,5} = 3,05/\alpha$ і умовно максимальний діаметр $D_{0,95} = 7/\alpha$.

На рис. 3 показані графіки ненормованих диференціальних $v(D)$ та інтегральних $V(D)$ функцій розподілення об'єму крапель за діаметром.

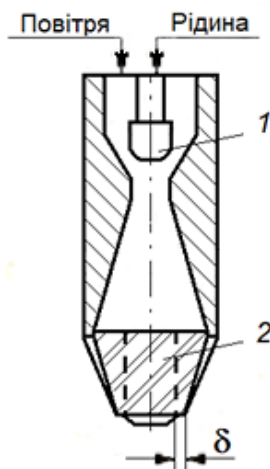


Рисунок 4 – Схема форсунки:
1 – відцентровий подавач рідини; 2 – змінні конічні шнекові завихрювачі потоку з різною глибиною канавки δ на виході

Об'єктом дослідження в даній роботі була пневматична форсунка, схема якої показана на рис. 4. Формування короткого факела диспергованої рідини забезпечується за рахунок закручування газового або газорідинного потоку на виході з форсунки. У конструкції форсунки передбачено пристрій для рівномірного розподілу рідини по стінці каналу ще до підходу до шнекового завихрювача. На виході з відцентрового подавача рідина рівномірно розподіляється по колу, а потім у вигляді плівки разом зі стислим повітрям по стінці каналу переміщується до шнекового завихрювача.

Слід відмітити, що при розрахунку швидкості витікання повітря з канавок завихрювача форсунки надлишковий тиск P_1 приймався таким, що дорівнює тиску перед форсункою. Це пояснюється тим фактом, що площа перерізу у вузькому місці в форсунці на порядок більша за сумарну площу перерізу восьми вихідних отворів з канавок шнекового завихрювача. Відповідно гідравлічні втрати тиску повітря на цій ділянці можна не брати до уваги.

На виході з канавок шнекового завихрювача відбувається взаємодія високошвидкісного потоку повітря і рідини та формується газорідинний потік, який під

дією відцентрової сили набуває форми порожнистого конуса. Така форма факела диспергованої рідини доцільна для топок або контактних апаратів з обмеженими розмірами робочого простору.

У даній роботі дослідження проводились стосовно умов роботи камери згоряння випарних установок з зануреними пальниками. Попередньо, перед вогневими дослідженнями, були проведені вимірювання дисперсного складу крапель води, яка розпильюється пневматичною форсункою описаної конструкції з метою виявити вплив конструктивних і режимних параметрів її роботи на якість диспергування. Так, діаметр циліндричного завихрювача на виході з корпусу форсунки складав 12 мм, зазор δ (тобто, глибина канавки) при використанні змінних конічних шнекових завихрювачів встановлювався як 0,4; 0,7; 0,9 та 1,45 мм. Тиск повітря перед форсункою був в межах $P_r = (0,6-3)10^5$ Па, витрата повітря $G_r = 2-39,5$ кг/год; відношення витрат $G_r/G_p = 0,4-4,5$; розрахункова швидкість витікання повітря з форсунки через зазор δ змінювалась в діапазоні $w_r = 40-310$ м/с. Витрати води і повітря вимірювалися за допомогою ротаметрів.

Досліди проводилися за умови відповідного фіксованого тиску повітря P_1 . Співвідношення G_r/G_p змінювалося витратою води G_p . Помічено, що зі збільшенням G_p витрата повітря дещо зменшувалася за рахунок часткового перекривання рідиною канавок завихрювача, що враховувалось під час розрахунків.

Для проведення досліджень в умовах високошвидкісного газорідного потоку, сформованого пневматичною форсункою, в роботі розроблено методику вимірювання дисперсного складу крапель із використанням лічильно-імпульсного методу.

По-перше, як показано на рис. 5, нахилом форсунки необхідно забезпечити нормальне – зверху вниз – натікання краплинного потоку на електроди.

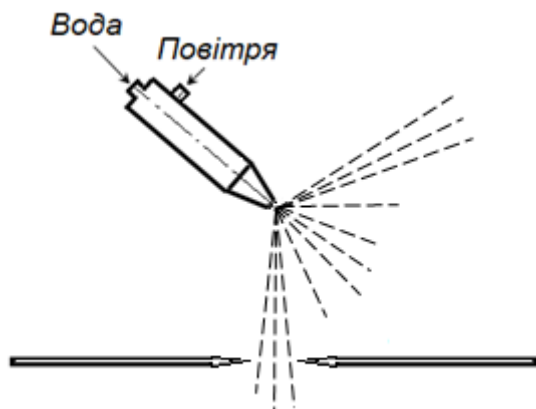


Рисунок 5 – Схема натікання крапель на електроди датчика

По-друге, кінці електродів слід розміщувати в середині твірної полого конуса факела диспергованої води шириною 2–3 мм. З використанням електронного осцилографа було виявлено, що під час виведення кінців електродів з вузької зони газорідного потоку в один або інший бік плівка рідини, що утворюється на електродах під час осадження на них крапель, завдяки ежекції проскакує уздовж електрода і потрапляє в міжелектродний зазор. У такому випадку частотомір фіксує хибні імпульси, форма яких, амплітуда і тривалість істотно перевищують параметри справжніх сигналів, які виникають під час

замикання електродів окремими краплями.

За умов правильного розташування електродів у межах краплинного потоку хибні сигнали не виникають.

Приведений дисперсний склад, що характеризує всю сукупність крапель, утворених форсункою, обчислюється на основі локальних вимірювань функції розподілу $\psi(D)$, але з урахуванням локальних значень густини зрошення в цих же точках факела, яку можна вимірювати відбірною трубкою.

Експериментально було з'ясовано, що на периферійних за радіусом зонах пологоконусного факела після форсунки питома витрата рідкої компоненти значно змен-

шується, і фракційний склад крапель також стає дрібнішим. Тобто приведений дисперсний склад для всієї сукупності крапель значною мірою формується за рахунок центральної зони за товщиною зони факела, де питома витрата диспергованої води найбільша. Тому результати вимірювань дисперсного складу крапель тільки в точці факела досить коректно характеризують тонкість розпилю рідини для досліджуваної форсунки.

Результати вимірювань засвідчили, що під час використання такої пневматичної форсунки процес дроблення та утворення крапель завершується на відстані 10–12 мм від форсунки, і далі дисперсний склад не змінюється, а тільки відбувається розкриття полого конічного факела і розсіювання крапель у просторі. Тому подальші вимірювання проводилися на відстані 15–20 мм від форсунки. не удавалось

В дослідженнях не вдавалось повторити абсолютно однакові значення швидкостей витікання повітря з форсунки w_r , тому об'єднувались результати для близьких розрахункових значень w_r , як показано на графіках (рис. 6). Тут представлено деякі типові експериментальні залежності модального діаметра D_m функції $v(D)$ залежно від співвідношення витрат G_r/G_p .

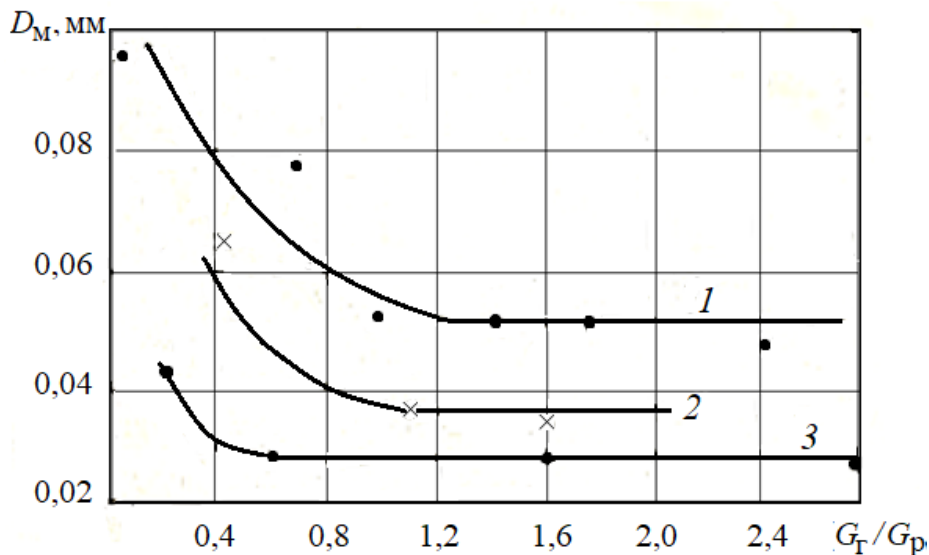


Рисунок 6 – Типові залежності $D_m = f(G_r/G_p)$:

$\delta = 0,9$ мм; 1 – $w_r = 47-50$ м/с; 2 – $w_r = 100-110$ м/с; 3 – $w_r = 215-220$ м/с

Як видно з рисунку, явно вираженими є дві зони. В першій зоні при відносно великих витратах повітря крупність розпилювання, що характеризується величиною D_m , не залежить від величини G_r/G_p , а тільки від швидкості витікання повітря w_r . В другій зоні при менших відносних витратах газу, коли кількості енергії, що передається від повітряного струменя до води за відповідної швидкості w_r , недостатня для закінчення процесу диспергування, крупність крапель помітно зростає.

Для практичних цілей доцільно налагодити роботу форсунки в автомобільній зоні, де буде забезпечена крупність розпилю, характерна для відповідної швидкості витікання повітря w_r . Крім того, для регулювання режимів експлуатації форсунки необхідно знати порогове значення $(G_r/G_p)_п$ переходу з однієї характерної зони в іншу.

На рис. 6 зведено дані залежності порогового значення $(G_r/G_p)_п$ від швидкості витікання повітря w_r , яка розраховувалась як теоретична для адіабатного процесу витікання повітря зі звужувального сопла [13].

$$w_r = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

Тут для повітря показник адіабати становить $k = 1,4$, газова стала $R = 287$ Дж/(кг·К).

На рис. 7 по осі абсцис поряд зі шкалою швидкості w_r наведена шкала P_2/P_1 для орієнтовного визначення порогового значення $(G_r/G_p)_п$. Значення P_2/P_1 отримано з для розрахунку теоретичної швидкості під час адіабатного витікання повітря із звужувального сопла.

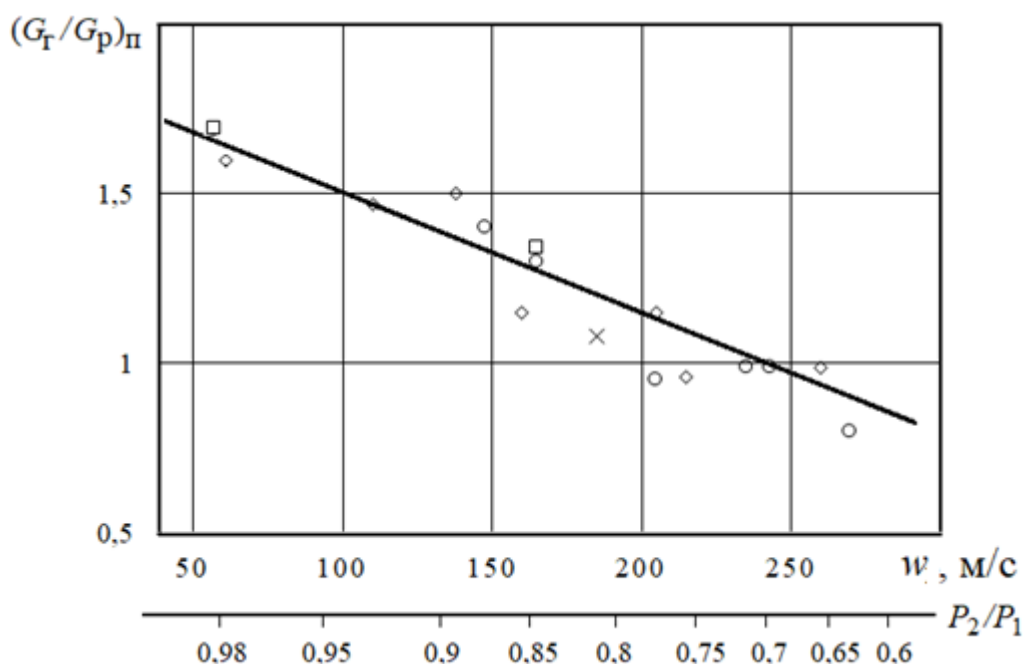


Рисунок 7 – Значення $(G_r/G_p)_п$, при яких відбувається перехід залежності $D_m(G_r/G_p)$ в автомодельну область:

$\times$ – $\delta=0,4$ мм; o – $0,7$; $\diamond$ – $0,9$; $\square$ – $1,45$ мм

Також, як видно з рис. 7, розмір каналів δ у конічному завихрювачі в наведеному діапазоні його значень не впливає на формування дисперсної структури факела.

У топках витрата рідкого палива G_p , що подається на форсунку, обумовлена тепловою потужністю пальника, але треба мати на увазі, що під час експлуатаційних випробувань регулювання якості диспергування завдяки зростанню швидкості w_r та, відповідно, витрати стисненого газу G_r шляхом підвищення надлишкового тиску P_1 можлива тільки при $(P_2/P_1) \ll (P_2/P_1)_{кр}$, як при витіканні зі звужувального сопла.

Слід також зазначити, що експлуатація диспергуючого пристрою за відносних витрат повітря, які значно перевищують порогове значення $(G_r/G_p) \gg (G_r/G_p)_п$, нецільна, оскільки при цьому енерговитрати на виробництво та подачу стисненого повітря значно зростають.

На рис. 8 представлені експериментальні дані щодо залежності $D_m = f(w_r)$ при роботі досліджуваної форсунки в режимах при $G_r/G_p > (G_r/G_p)_п$ для відповідних швид-

костей w_T .

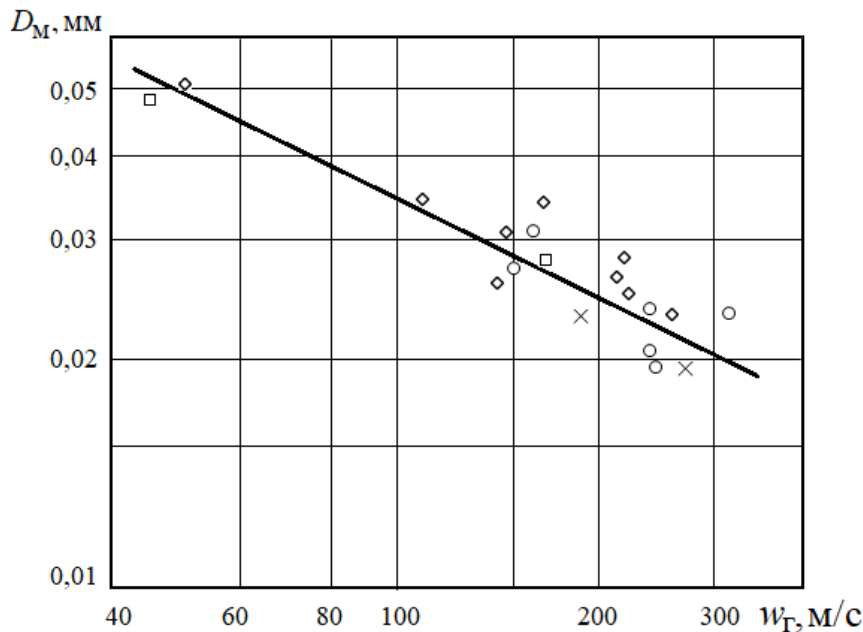


Рисунок 8 – Залежність модального діаметра крапель від швидкості газу:
 $\times - \delta = 0,4$ мм; $o - 0,7$; $\diamond - 0,9$; $\square - 1,45$ мм

При зміні швидкості в діапазоні $w_T = 40\text{--}300$ м/с для досліджуваної форсунки результати вимірювання можна апроксимувати формулою

$$D_M = \frac{0,36}{\sqrt{w_T}}.$$

Перспективним напрямом подальших досліджень є апробація даного методу на пневматичних форсунках інших конструкцій.

Висновки

1. Проведені дослідження роботи пневматичної форсунки для диспергування рідини, яка відтворює полоконусний факел з великим кутом розкриття (до 130°) і високу якість розпилювання (модальний діаметр крапель $D_M = 17\text{--}22$ мкм). Така тонкість розпилювання доцільна для інтенсифікації процесів тепломасообміну при використанні рідких палив в топках з обмеженими розмірами.

2. Для локальних вимірювань дисперсних параметрів краплинного потоку використано лічильно-імпульсний метод, що базується на реєстрації імпульсів електричного струму, які виникають при замиканні електродів краплями електропровідної рідини. При цьому, за допомогою однопараметричної залежності, яка описує дисперсний склад крапель, є можливість розрахувати диференціальні та інтегральні функції розподілу об'єму крапель по діаметру, модальний, медіанний, умовно максимальний діаметри крапель, а також питому витрату об'єму рідини в різних точках краплинного потоку.

3. В роботі експериментально встановлена залежність модального діаметра сукупності крапель диспергованої рідини від швидкості руху повітря на виході з форсунки.

ки w_T та співвідношення витрат повітря та рідини G_T/G_p . Показано, що для якісного диспергування рідини порогове значення відносної витрати стисненого повітря складає $(G_T/G_p)_п = 0,6-1$. Тому її подальше збільшення вже не призводить до зменшення діаметра крапель і не є доцільним.

4. Досліджено, що найкраща якість диспергування забезпечується при швидкості витікання повітря з форсунки, близької до критичної ($w_T = 280-300$ м/с), при відношенні тисків до форсунки та після неї $P_2/P_1 = 0,55-0,64$, тобто надлишковий порівняно з атмосферним тиск становить $P_{над} = (0,8-0,56) \cdot 10^5$ Па. Тому подальше підвищення тиску P_1 стисненого повітря перед форсункою, в якій вихідні канали кінцевого завихрювача є звужувальними соплами, не призводить до підвищення швидкості витікання повітря, і, відповідно, його витрати, а тільки збільшує невинновдані експлуатаційні витрати.

5. На використаній в роботі моделі пневматичної форсунки досліджено, що якість диспергування залежить від швидкості витікання повітря з неї, тобто від відношення тиску до і після розпилюючого пристрою P_2/P_1 , і також від відносної витрати повітря G_T/G_p . Але при цьому тонкість розпилювання практично не залежить від геометричних параметрів форсунки. Тому можливо використання результатів, одержаних в роботі, не тільки для подібних форсунок інших розмірів, а також для газо- чи парових розпилювачів інших конструкцій.

6. Доцільно під час вогневих випробувань форсунок, умови які характеризують якість згоряння рідкого палива, представляти у вигляді залежностей від співвідношення G_T/G_p , тобто від P_2/P_1 , що може бути використано при розробці систем регулювання процесів горіння.

Література

1. Kramm K., Orth M., Teiwes A., Kammerhofer J. C., Meunier V., Pietsch-Braune S., Heinrich S. Influence of Nozzle Parameters on Spray Pattern and Droplet Characteristics for a Two-Fluid Nozzle. *Chemie Ingenieur Technik*. 2023. Vol. 95. P. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.202200152>.
2. Ochman J., Bialik W., Gil S. An experimental study on liquid fuel atomization. *Metalurgija*. 2015. Vol. 54, No. 3. P. 559–562.
3. Islamova A., Tkachenko P., Shlegel N., Kuznetsov G. Secondary Atomization of Fuel Oil and Fuel Oil/Water Emulsion through Droplet-Droplet Collisions and Impingement on a Solid Wall. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 1008. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16021008>.
4. Nuytens D., Baetens K., De Schamphelleire M., Sonck B. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*. 2007. Vol. 97, No. 3. P. 333–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001>.
5. Peng L., Li Z., Zhang G., Bi X., Hu W., Tang M., Wang X., Peng P., Sheng G. A review of measurement techniques for aerosol effective density. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 778. Article No. 146248. ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146248>.
6. Poozesh S., Akafuah N. K., Campbell H. R., Bashiri F., Saito K. Experimental and Mathematical Tools to Predict Droplet Size and Velocity Distribution for a Two-Fluid Nozzle. *Fluids*. 2020. Vol. 5, No. 4. Article No. 231. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids5040231>.
7. Rimbert N., Castanet G. Liquid atomization out of a full cone pressure swirl nozzle. *arXiv preprint*. 2010. arXiv:1008.2474. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1008.2474>.
8. Sijs R., Kooij S., Bonn D. Droplet size from Venturi air induction spray nozzles.

Experiments in Fluids. 2023. Vol. 64. Article No. 43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-023-03582-2>.

9. Cerruto E., Manetto G., Papa R., Longo D. Modelling Spray Pressure Effects on Droplet Size Distribution from Agricultural Nozzles. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 19. Article No. 9283. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199283>.

10. Minov S. V., Cointault F., Vangeyte J., Pieters J. G., Nuyttens D. Spray Droplet Characterization from a Single Nozzle by High Speed Image Analysis Using an In-Focus Droplet Criterion. *Sensors*. 2016. Vol. 16, No. 2. Article No. 218. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16020218>.

11. Li C., Christen C. E., Hogan C. J. Jr, Fredericks S. A., Hong J. Automated Droplet Size Distribution Measurements Using Digital Inline Holography. *arXiv preprint*. 2019. arXiv:1906.09634.

12. Wicks, M., Dukler, A. E. In situ measurements of drop size distribution in two-phase flow: A new method for electrical conducting liquids. Int. Heat Transfer Conf., Chicago, Illinois. 1966.

13. Moran, Michael J., Shapiro, Howard N., Boettner, Daisie D., Bailey, Margaret B., Fundamentals of engineering thermodynamics. 9th edition, Iowa State University, Oboken, NJ: Wiley, 2018.

Bibliography (transliterated)

1. Kramm K., Orth M., Teiwes A., Kammerhofer J. C., Meunier V., Pietsch-Braune S., Heinrich S. Influence of Nozzle Parameters on Spray Pattern and Droplet Characteristics for a Two-Fluid Nozzle. *Chemie Ingenieur Technik*. 2023. Vol. 95. P. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.202200152>.

2. Ochman J., Bialik W., Gil S. An experimental study on liquid fuel atomization. *Metalurgija*. 2015. Vol. 54, No. 3. P. 559–562.

3. Islamova A., Tkachenko P., Shlegel N., Kuznetsov G. Secondary Atomization of Fuel Oil and Fuel Oil/Water Emulsion through Droplet-Droplet Collisions and Impingement on a Solid Wall. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 1008. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16021008>.

4. Nuyttens D., Baetens K., De Schamphelleire M., Sonck B. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*. 2007. Vol. 97, No. 3. P. 333–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001>.

5. Peng L., Li Z., Zhang G., Bi X., Hu W., Tang M., Wang X., Peng P., Sheng G. A review of measurement techniques for aerosol effective density. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 778. Article No. 146248. ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146248>.

6. Poozesh S., Akafuah N. K., Campbell H. R., Bashiri F., Saito K. Experimental and Mathematical Tools to Predict Droplet Size and Velocity Distribution for a Two-Fluid Nozzle. *Fluids*. 2020. Vol. 5, No. 4. Article No. 231. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids5040231>.

7. Rimbart N., Castanet G. Liquid atomization out of a full cone pressure swirl nozzle. *arXiv preprint*. 2010. arXiv:1008.2474. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1008.2474>.

8. Sijs R., Kooij S., Bonn D. Droplet size from Venturi air induction spray nozzles. *Experiments in Fluids*. 2023. Vol. 64. Article No. 43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-023-03582-2>.

9. Cerruto E., Manetto G., Papa R., Longo D. Modelling Spray Pressure Effects on Droplet Size Distribution from Agricultural Nozzles. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 19.

Article No. 9283. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199283>.

10. Minov S. V., Cointault F., Vangeyte J., Pieters J. G., Nuytens D. Spray Droplet Characterization from a Single Nozzle by High Speed Image Analysis Using an In-Focus Droplet Criterion. *Sensors*. 2016. Vol. 16, No. 2. Article No. 218. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16020218>.

11. Li C., Christen C. E., Hogan C. J. Jr, Fredericks S. A., Hong J. Automated Droplet Size Distribution Measurements Using Digital Inline Holography. *arXiv preprint*. 2019. arXiv:1906.09634.

12. Wicks, M., Dukler, A. E. In situ measurements of drop size distribution in two-phase flow: A new method for electrical conducting liquids. *Int. Heat Transfer Conf.*, Chicago, Illinois. 1966.

13. Moran, Michael J., Shapiro, Howard N., Boettner, Daisie D., Bailey, Margaret B., *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 9th edition, Iowa State University, Oboken, NJ: Wiley, 2018.

УДК 66.069.83

О. Р. Пересьолков, канд. техн. наук, доцент, М. П. Кунденко, д-р техн. наук, професор,
О. В. Круглякова, канд. техн. наук, доцент, Є. С. Демчук, аспірант

ВИМІРЮВАННЯ ДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ КРАПЕЛЬ У ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ГАЗОРІДИННОМУ ПОТОЦІ ЗА ПНЕВМАТИЧНОЮ ФОРСУНКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛІЧІЛЬНО-ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ

У роботі досліджено дисперсну структуру крапель у високошвидкісному газорідинному потоці, сформованому пневматичною форсункою з багатоканальним спеціальної шнековим завихрювачем. Така форсунка створює полоконусний факел диспергованої рідини з великим кутом розкриття і високою якістю розпилювання. Це є актуальним для використання в топках та тепломасообмінних апаратах з обмеженими розмірами активного простору.

Для локальних вимірювань дисперсних параметрів краплинного потоку використано лічильно-імпульсний метод, що базується на реєстрації імпульсів електричного струму, які виникають при замиканні електродів краплями електропровідної рідини. При цьому за допомогою однопараметричної залежності, яка описує дисперсний склад крапель, є можливість розрахувати диференціальні та інтегральні функції розподілення об'єму крапель за діаметрами, модальний, медіанний, умовно максимальний діаметри крапель, а також питому витрату об'єму рідини в різних точках краплинного потоку.

Експериментально показана залежність модального діаметра сукупності крапель диспергованої рідини від швидкості руху повітря на виході з форсунки та співвідношення витрат повітря та рідини.

Встановлено, що для відповідної швидкості витікання повітря з форсунки при поступовому зменшенні відносної витрати повітря, є її порогове значення, при якому автотельна зона за крупності розпилювання рідини переходить в зону, де крупність крапель помітно зростає.

Результати досліджень дають можливість регулювання процесом диспергування рідини за рахунок швидкості витікання повітря з форсунки, тобто, за перепадом його тиску до і після розпилювача за умов оптимізації експлуатаційних витрат.

Запропонована методика придатна для вирішення дослідницьких і прикладних завдань, а отримані результати можуть бути використані при розробці й удосконаленні конструкцій форсунок, використання яких забезпечує оптимізацію режимів розпилювання рідини, підвищення енергоефективності процесів тепломасообміну в теплоенергетичних установках та розробці систем автоматизації їх роботи.

Ключові слова: диспергування рідини, лічильно-імпульсний метод, дисперсна структура, якість розпилювання, швидкість потоку, регулювання перепаду тиску, інтенсифікація процесів тепломасообміну.

O. R. Pereselkov, M. P. Kundenko, O. V. Kruglyakova, Ye. S. Demchuk

MEASUREMENT OF DROPLET SIZE DISTRIBUTION IN A HIGH-VELOCITY GAS-LIQUID FLOW OF A PNEUMATIC NOZZLE USING THE COUNT-PULSE METHOD

This study investigates the droplet size distribution in a high-velocity gas-liquid flow generated by a pneumatic nozzle equipped with a multi-channel, specially designed screw-type swirl insert. Such a nozzle produces a hollow-cone spray pattern with a wide spray angle and high atomization quality, which is particularly relevant for use in furnaces and heat-and-mass transfer units with limited active space.

Local measurements of the droplet flow parameters were performed using the count-pulse method, which is based on recording electrical current pulses generated when droplets of a conductive liquid bridge the gap between electrodes. Using a single-parameter function describing the droplet size distribution, it is possible to determine the differential and integral volume distribution functions by droplet diameter, the modal, median, and conditionally maximum droplet diameters, as well as the specific liquid volume flux at various points within the spray.

Experimental results demonstrate the dependence of the modal droplet diameter on the air velocity at the nozzle outlet and on the air-to-liquid flow rate ratio. It was established that for a given air exit velocity, a gradual decrease in the relative air flow rate reveals a threshold value at which the self-similar atomization zone transitions into a region where droplet size increases markedly.

The findings enable control of the liquid atomization process by adjusting the air velocity at the nozzle outlet, i.e., by varying the pressure drop across the nozzle, thereby optimizing operating costs. The proposed methodology is suitable for both research and practical applications, and the results can be used in the design and improvement of atomizer configurations to ensure optimal spray regimes, enhance the energy efficiency of heat-and-mass transfer processes in thermal power equipment, and develop automation systems for their operation.

Keywords: liquid dispersion, pulse-counting method, dispersed structure, spray quality, flow rate, pressure drop regulation, intensification of heat and mass transfer processes.

Є. Д. Пономаренко, доцент, А. М. Миронов, канд. техн. наук, доцент,
Л. В. Соловей, ст. викл., М. В. Ільченко, канд. техн. наук, доцент,
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор, С. М. Биканов, канд. техн. наук, доцент,
Є. В. Краснокутський, канд. техн. наук, доцент

ІНТЕГРАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА RSM-ОПТИМІЗАЦІЇ ДО МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ У ГАЛУЗІ ХІМІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: математичне моделювання, планування експерименту, хімічна інженерія, оптимізація, RSM, поверхні відгуку, адекватність, оптимум, чисельні методи.

Вступ. У сучасних умовах розвитку науки і техніки математичне моделювання є невід’ємним інструментом досліджень та оптимізації хіміко-технологічних процесів. Особливої актуальності воно набуває у хімічній інженерії, де дослідження кінетики реакцій, процесів тепло- і масообміну, гідродинаміки та каталітичних систем потребує комплексного аналізу впливу багатьох взаємодіючих параметрів. Математичні методи дозволяють досліджувати поведінку хімічних реакторів, випарників, ректифікаційних колон, сушарок, систем каталізу, а також оптимізувати енергоспоживання та вихід цільових продуктів без проведення експериментів на промисловому обладнанні.

Теорія планування експерименту розпочалася з робіт видатного англійського вченого Р. Фішера в 1930-ті роки. Саме він довів доцільність використання статистичних методів у проблемі визначення оптимальних умов проведення експерименту. У хіміко-технологічних системах, де одночасно діють десятки факторів – температура, тиск, концентрації реагентів, швидкість перемішування, час контакту – використання принципів планування експерименту дає змогу мінімізувати кількість лабораторних дослідів для побудови достовірної моделі процесу. Такий підхід широко застосовується під час розробки схем каталізу, оцінки ефективності нових реагентів або оптимізації параметрів полімеризації, абсорбції, екстракції. Автором перших наукових робіт з планування експерименту виступив Ф. Йетс. Надалі цей напрямок був розвинений у 1950-ті роки у США Дж. Боксом та його співробітниками. На території сучасної України ця теорія розвивається в наукових колективах, заснованих А. Г. Бондар та В. А. Вознесенським, а інженери-дослідники дедалі ширше застосовують ці методи на практиці.

Планування експерименту – це системний підхід, який дозволяє організувати проведення дослідів так, щоб отримати максимум інформації при мінімальних витратах. Це сукупність дій, які спрямовані на раціональну організацію експериментальних досліджень: оптимального вибору досліджуваних факторів, плану експерименту та методів аналізу одержаних експериментальних результатів. Основними завданнями при плануванні експерименту є виявлення значущих факторів, оцінка їх впливу та взаємодій на властивості об’єкта, побудова адекватної математичної моделі та використання її в цілях оптимізації, а також для інженерних розрахунків.

Метою цієї роботи є розробка математичної моделі за експериментальними даними, проведення статистичного аналізу результатів, аналізу впливу факторів дослі-

джуваного процесу на відгук (вихідний параметр) та виконання оптимізаційного дослідження.

Аналіз літератури. Математичне моделювання та планування експерименту забезпечують можливість отримання оптимальних режимів процесів хімічних технологій із мінімальними затратами ресурсів. У контексті хімічної інженерії методологія планування експерименту та побудови поверхонь відгуку (RSM) стала стандартним інструментом при дослідженні реакційного синтезу, процесів розділення багатокомпонентних систем, розробці каталізаторів та масштабуванні лабораторних даних до промислових умов. У хімічних реакторах і апаратах часто спостерігаються нелінійні залежності між параметрами, тому застосування поліноміальних моделей другого порядку є найбільш доцільним для відтворення складної динаміки системи.

Перші підходи до експериментального пошуку оптимуму були запропоновані Боксом і Вілсоном [1]. Це заклало основу для подальшого розвитку методології поверхонь відгуку. Розширений аналіз цього напрямку подано у працях Бокса і Дрейпера [2], Монтгомері [3], а також Хартмана [4], де розглядаються сучасні методи побудови моделей відгуку та їх застосування для оптимізації технологічних процесів.

У низці сучасних досліджень демонструється широка застосовність методів планування експерименту й моделювання у хімічній інженерії. Так, у роботі [5] здійснено огляд оптимізації різноманітних хімічних процесів за допомогою RSM, зокрема у виробництві біодизеля та екстракційних технологіях, й показано, що RSM – це ефективний інструмент для зменшення кількості дослідів та врахування взаємодій факторів. У [6] застосовано CCD-план у RSM для оптимізації умов мікрохвильового піролізу сахарної тростини з метою одержання активованого вугілля, що ілюструє перехід методики на технології термохімічної обробки й матеріалів. У дослідженні [7] RSM використовується для оптимізації синтезу полімер-графенового оксидного нанокompозиту в контексті адсорбції важких металів – приклад, який прямо демонструє можливість математичного планування в матеріалознавстві та хімічній технології. Нарешті, [8] описує використання програмного пакету MathCAD у курсах реакційної інженерії для вирішення нелінійних та інтегральних рівнянь реакторів, підкреслюючи практичну корисність середовища для хімічних інженерів і підтверджуючи, що програмний аспект має важливе місце у математичному моделюванні процесів. Усі ці джерела підтверджують, що математичні методи моделювання, статистичного планування експерименту та програмні інструменти впевнено входять у арсенал фахівців, дозволяючи підвищити ефективність, зменшити експерименти та масштабувати процеси з лабораторії до промисловості.

Математичні моделі об'єктів, які отримуються за допомогою методів математичного планування експерименту, називають експериментально-статистичними. Вони дозволяють кількісно визначати та прогнозувати значення відгуків об'єкта за конкретних значень вхідних факторів. Ці моделі застосовуються на практиці лише в області зміни вхідних чинників з імовірністю, яка використовувалася експериментально для побудови експериментально-статистичних моделей.

Основні типи експериментальних планів:

- факторіальні плани (2^k , 3^k) – дозволяють оцінити головні ефекти та взаємодії між факторами;
- центральньо-композиційний план (ЦКП, CCD) містить факторіальні точки, осеві точки та центр; дозволяє оцінити квадратичні ефекти;
- план Бокса-Бенкена – економний варіант квадратичного плану без крайніх точок [2], гніздові, або ієрархічні плани, факторні плани з угрупованням, та інші [3].

У хімічній технології ці типи планів активно застосовуються для пошуку оптимальних параметрів реакцій полімеризації, гідрування, сушки, ферментації та інших процесів, де складність системи не дозволяє побудувати аналітичну модель з простих або фундаментальних рівнянь. Саме експериментально-статистичні моделі, отримані за допомогою ЦКП, дозволяють передбачити поведінку системи при зміні вхідних факторів і забезпечити стабільність якості продукту.

Існує чимало робіт, де розглянуто різні аспекти застосування методів планування експериментів в різних областях науки та діяльності людини. В українській науковій літературі суттєвий внесок у розвиток методів планування експерименту для потреб хімічної технології зробили А. Г. Бондар, Г. О. Статюха та інші вчені, які показали практичні приклади постановки та аналізу експериментів з урахуванням специфіки галузі.

На практиці часто виникає така ситуація, коли дослідник не має інформації про істинний вид моделі. У такому випадку спочатку планують експеримент першого порядку (повний факторний або його репліку) та отримують лінійну модель щодо варійованих змінних. Після проведення дослідів перевіряється адекватність лінійної моделі. Якщо лінійна модель неадекватна, намагаються побудувати квадратичну модель [4].

Побудова математичних моделей. Основною метою застосування математичних методів планування експерименту є отримання математичного опису поведінки об'єкта (математичної моделі об'єкта) при зміні параметрів експерименту (вхідних факторів). Методологія поверхні відгуку RSM використовує статистичні методи для побудови емпіричної моделі, яка описує зв'язок між вхідними та вихідними змінними. Д. Бокс та К. Вілсон запропонували [1] використовувати для цього поліноміальну модель:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{\substack{j=1 \\ u=1 \\ j \neq u}}^k \beta_{ju} x_j x_u + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \dots + \varepsilon. \quad (1)$$

У практиці хімічної інженерії RSM часто використовується для моделювання залежностей між технологічними змінними – наприклад, між температурою реакції, концентрацією каталізатора і швидкістю перетворення реагентів. Це дає змогу визначити не лише оптимальні режими реакції, а й діапазони їх стійкості, що критично важливо при масштабуванні процесу з лабораторного на промисловий рівень.

Для отримання моделей другого порядку найбільш широко застосовується центральний композиційний план. Він є факторним планом типу 2^k при $k < 5$ або напівреплікою від нього при $k \geq 5$. Для того, щоб при підборі моделі другого порядку можна було оцінити її параметри, план експерименту повинен містити щонайменше три рівні кожного фактору. Додатково проводяться досліді у центрі плану (m_0 дослідів) і в $2k$ зоряних точках, розташованих на координатних осях факторного простору. Координати зоряних точок наступні: $(\pm\alpha, 0, \dots, 0)$, $(0, \pm\alpha, 0, \dots, 0)$, $\dots$, $(0, 0, \dots, 0, \pm\alpha)$, де α – відстань від центра плану до зоряної точки – зоряне плече.

На рис. 1 наведений центральний композиційний план (ЦКП) для $k = 2$ факторів. Для двох факторів проводять 4 основних досліді у факторних точках (1–4), 4 додаткових досліді в зоряних точках, розташованих на відстані зоряного плеча α від центра плану на координатних осях та досліді в центрі.

На рис. 2 – ЦКП для $k = 3$ факторів. Проводять 8 основних дослідів у факторних точках (1–8), додаткові досліди в зоряних точках (9 – 14), які розташовані на відстані зоряного плеча α від центра плану на координатних осях та досліді в центрі (15).

Композиційний план отримує різні властивості внаслідок вибору плеча α та точок в центрі плану – m_0 .

При вивченні поверхні відгуку переважним класом планів є клас ротатабельних планів. Для ротатабельних планів дисперсія прогнозованого значення відгуку у деякій точці x залежить тільки від відстані цієї точки до центру плану, а не від напрямку на неї. Для плану, що володіє такою властивістю, дисперсія не змінюється при обертанні плану навколо центру $(0, 0, \dots, 0)$; звідси й походить назва – ротатабельний план (rotatable – той, що допускає обертання). Необхідно, щоб точки плану були розташовані на декількох сферах. Радіус сфери, на якій лежать факторні точки ядра плану, збігається з величиною зоряного плеча α . Друга, менша сфера ротатабельного плану має нульовий радіус, співпадає з центром плану, там лежать – m_0 точок. Ротатабельність ЦКП забезпечується вибором плеча α за формулою $\alpha = \rho = 2^{(k-p)/4}$.

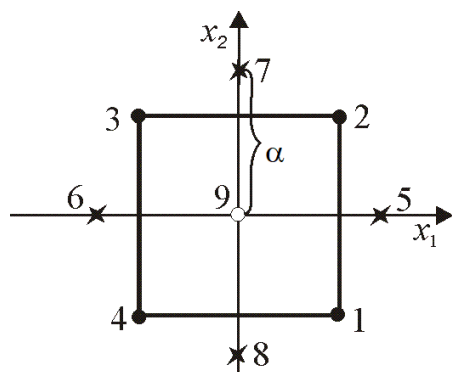


Рисунок 1 – Композиційний план другого порядку для $k=2$

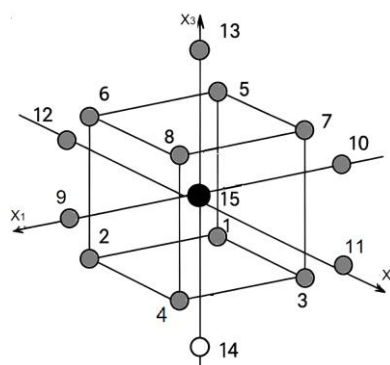


Рисунок 2 – Композиційний план другого порядку для $k=3$

Кількість точок m_0 в центрі плану визначається за умов, щоб дисперсії відгуку на початку координат і на одиничній відстані від нього були рівними. Такий план називається ротатабельним уніформ-планом [4, 9, 10].

У табл. 1 наведено значення радіуса ρ сфери, на якій розташовані точки ядра плану, зоряного плеча α , число точок у центрі плану m_0 для різного числа факторів в ротатабельних уніформ-планах [10].

Таблиця 1 – Вихідні дані

	Число факторів								
	2	3	4	5	5	6	6	7	7
Ядро плану	2^2	2^3	2^4	2^5	2^{5-1}	2^6	2^{6-1}	2^7	2^{7-1}
ρ	1,41	1,73	2,00	2,24	2,24	2,45	2,45	2,64	2,64
α	1,41	1,68	2,00	2,38	2,00	2,83	2,38	3,36	2,83
m_0	5	6	7	10	6	15	9	21	14

За результатами обробки даних експерименту отримують рівняння регресії 2 порядку

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{k-1,k}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2. \quad (2)$$

Коефіцієнти b_j рівняння регресії (2) визначаються методом найменших квадратів і є оцінками відповідних коефіцієнтів β_j теоретичного поліному (1).

Для знаходження коефіцієнтів рівняння регресії необхідно розв'язувати систему нормальних рівнянь

$$(X^T X)b = X^T Y, \quad (3)$$

де X – розширена матриця планування, яка включає стовпці плану експерименту та стовпці для розрахунку коефіцієнтів при взаємодіях факторів та квадратах факторів.

Дисперсію відтворюваності s_{π}^2 для ротатабельних планів другого порядку одержують за m_0 дослідями у центрі плану:

$$s_{\pi}^2 = \frac{1}{m_0 - 1} \sum_{u=1}^{m_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2, \quad \bar{y}_0 = \frac{\sum_{u=1}^{m_0} y_{0u}}{m_0}. \quad (4)$$

Число ступенів свободи дисперсії відтворюваності дорівнює $m_0 - 1$.

Значимість коефіцієнтів моделі, що постулюється, оцінюють за t -критерієм:

$$t_j = |b_j| / s_{b_j}, \quad (5)$$

$$\text{де } s_{b_j} = \sqrt{s_{\pi}^2 (X^T X)^{-1}_{jj}}.$$

Розраховане значення t_j повинне перевищувати критичне значення розподілу Стюдента $t(1-q/2; m_0-1)$. Якщо незначимим виявляється один з коефіцієнтів при квадратичних членах, після його виключення інші коефіцієнти необхідно перерахувати, оскільки ротатабельний план не є ортогональним.

Середній залишковий квадрат із числом ступенів свободи $N-l$, де l – кількість значимих коефіцієнтів у рівнянні регресії, визначається за формулою

$$s_{\text{зал}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N - l}. \quad (6)$$

Сума квадратів неадекватності являє собою різницю залишкової суми квадратів і суми квадратів похибки, а число її ступенів свободи є різницею ступенів свободи відповідних сум квадратів. Таким чином, середній квадрат неадекватності визначається як

$$s_{\text{на}}^2 = \frac{s_{\text{зал}}^2 (N - l) - s_{\pi}^2 (m_0 - 1)}{N - l - m_0 + 1}. \quad (7)$$

Отримане рівняння регресії оцінюється на адекватність за критерієм Фішера. Якщо виконується нерівність $F < F(1-q, N-l-m_0+1; m_0-1)$, де $F = s_{\text{на}}^2 / s_{\text{п}}^2$, рівняння регресії адекватно описує досліджуваний процес.

Проблема пошуку оптимальних параметрів технологічних систем нерозривно пов'язана із методами чисельної оптимізації. У класичних працях Рейвіндрана [11] та Хімелблума [12] наведені ефективні алгоритми для задач з обмеженнями та без обмежень, які можуть бути застосовані в задачах хімічної технології, при пошуку оптимуму математичної моделі, при вирішенні оптимізаційних завдань для відгуків об'єкта.

Для хімічних процесів пошук оптимуму часто означає максимізацію виходу цільового продукту або мінімізацію енерговитрат при забезпеченні необхідної селективності реакції. Використання чисельних методів оптимізації в поєднанні з експериментальною моделлю процесу дозволяє створювати цифрові двійники хімічних установок, що значно скорочує час проєктування та покращує надійність технологічних рішень. Програмне середовище MathCAD у цьому випадку є ефективним інструментом для реалізації багатопараметричної оптимізації та візуалізації поверхонь відгуку.

На практиці для оптимізації функцій, що отримані за результатами планованого експерименту другого порядку, часто використовують наступні чисельні методи:

- найшвидшого спуску та Коші – ітеративні градієнтні методи пошуку мінімуму;
- алгоритми безградієнтної оптимізації Нелдера-Міда та Гауса-Зейделя.

Монтгомері [3] зазначав, що методи планування експерименту та RSM забезпечують ефективне моделювання та оптимізацію технологічних процесів, а поєднання статистичних та чисельних методів дозволяє отримати надійні моделі та визначити оптимальні режими роботи обладнання.

В роботі розглянуто процес руйнування одного з жароміцних нікелевих сплавів. За основу числових матеріалів експерименту обрані дані з літератури [4]. Ефективність процесу оцінюється за тривалістю часу до руйнування сплаву. Цей показник був обраний як вихідний параметр (відгук) y , год. За апіорною інформацією факторами, що впливають на тривалість часу до руйнування жароміцного нікелевого сплаву є температура загартування, °C, температура старіння, °C, час старіння, год. Ці фактори незалежні між собою та сумісні. На основі апіорної інформації та попередніх дослідів були визначені області зміни факторів:

- $1010 < z_1 < 1190$ – температура загартування, °C;
- $650 < z_2 < 850$ – температура старіння, °C;
- $0,5 < z_3 < 7,5$ – час старіння, год.

Рівні, інтервали варіювання, «зоряні» точки факторів у натуральному та кодованому значеннях наведені в табл. 2.

Для побудови математичної моделі процесу був реалізований центральний композиційний ротатбельний план другого порядку, оскільки попередні дослідження вказували на наявність нелінійності в досліджуваній області.

При проведенні центрального композиційного ротатбельного плану 8 дослідів відповідають повному факторному експерименту 2^3 , 6 паралельних дослідів проведено в центрі плану та 6 дослідів – в «зоряних» точках.

У табл. 3 наведено результати реалізації центрального композиційного ротатбельного плану (y – тривалість часу до руйнування сплаву).

Таблиця 2 – Рівні, інтервали варіювання, «зоряні» точки вхідних параметрів

Умови планування	натуральні значення			кодовані значення факторів			
	$z_1, T, ^\circ\text{C}$	$z_2, T, ^\circ\text{C}$	$z_3, \text{год}$		x_1	x_2	x_3
Основний рівень, z_j^0	1100	750	4	x_j^0	0	0	0
Інтервал варіювання, Δz_j	50	50	2	Δx_j	1	1	1
Верхній рівень, $z_{j\max}$	1150	800	6	$x_{j\max}$	1	1	1
Нижній рівень, $z_{j\min}$	1050	700	2	$x_{j\min}$	-1	-1	-1
Верхня «зоряна» точка, d	1184	834	7,364	d	1,618	1,618	1,618
Нижня «зоряна» точка, d	1016	666	0,636	d	-1,618	-1,618	-1,618

Таблиця 3 – План експерименту та результати експерименту

№ досліду	x_1	x_2	x_3	у, год.	№ досліду	x_1	x_2	x_3	у, год.
8	+1	+1	+1	30,2	11	0	+1,682	0	25,3
7	-1	+1	+1	20,2	12	0	-1,682	0	10,4
6	+1	-1	+1	7,0	13	0	0	+1,682	18,0
5	-1	-1	+1	14,1	14	0	0	-1,682	20,0
4	+1	+1	-1	43,0	15	0	0	0	29,0
3	-1	+1	-1	5,8	16	0	0	0	28,4
2	+1	-1	-1	27,9	17	0	0	0	28,6
1	-1	-1	-1	8,0	18	0	0	0	28,8
9	+1,682	0	0	36,0	19	0	0	0	28,7
10	-1,682	0	0	12,1	20	0	0	0	30,5

Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії другого порядку і статистичну обробку результатів експерименту виконано у MathCAD Prime. Коефіцієнти рівняння регресії b_j розраховані методом найменших квадратів за формулою (3): $b_0 = 29,008$; $b_1 = 7,337$; $b_2 = 4,925$; $b_3 = -1,213$; $b_4 = 4,3$; $b_5 = -6,775$; $b_6 = 2,05$; $b_7 = -1,802$; $b_8 = -3,994$; $b_9 = -3,558$.

Дисперсія відтворюваності розрахована за сумою квадратів похибки з дослідів у

центрі плану $ss_{\pi} = \sum_{u=1}^{m_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2 = 2,9$ та числом ступенів свободи $m_0 - 1 = 5$:

$$s_{\pi}^2 = \frac{1}{m_0 - 1} \sum_{u=1}^{m_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2 = \frac{2,9}{5} = 0,58,$$

де $\bar{y}_0 = \sum_{u=1}^{m_0} y_{0u} / m_0 = 29$ – середнє значення з дослідів в центрі плану.

Значимість коефіцієнтів моделі оцінюється за критерієм Стюдента t_j для кожного коефіцієнта моделі за формулою (5) і має наступні значення: $t_0 = 93,391$; $t_1 = 35,6$; $t_2 = 23,898$; $t_3 = 5,885$; $t_4 = 15,97$; $t_5 = 25,162$; $t_6 = 7,614$; $t_7 = 8,984$; $t_8 = 19,91$; $t_9 = 17,884$.

Розраховані значення t_j перевищують критичне значення розподілу Стюдента $t(1-q/2; m_0-1) = t(1-0,05/2; 5) = 2,571$, що свідчить про значимість всіх коефіцієнтів.

У результаті розрахунків отримано математичну модель залежності тривалості часу до руйнування нікелевого сплаву від температури загартовування, температури старіння, часу старіння в системі кодованих факторів:

$$\hat{y}(\bar{x}) = 29,008 + 7,337x_1 + 4,925x_2 - 1,213x_3 + 4,3x_1x_2 - 6,775x_1x_3 + 2,05x_2x_3 - 1,802x_1^2 - 3,994x_2^2 - 3,588x_3^2. \quad (8)$$

За рівнянням (8) для всіх дослідів визначені розрахункові значення відгуку $\hat{y}_i$.

Для оцінки адекватності моделі розрахована залишкова сума квадратів $ss_{\text{зал}} = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 = 9,674$ і середній квадрат неадекватності $s_{\text{на}}^2 = \frac{ss_{\text{зал}} - ss_{\text{п}}}{N - l - m_0 + 1} = 1,355$.

Адекватність отриманої математичної моделі можна визначити за критерієм Фішера: $F = s_{\text{на}}^2 / s_{\text{п}}^2 = 1,355 / 0,58 = 2,336$. Це рівняння регресії адекватно описує досліджуваний процес руйнування нікелевого сплаву в діапазоні зміни факторів, оскільки розраховане значення критерія Фішера менше за критичне значення розподілу Фішера при рівні значущості $1 - q$, $q = 0,05$ та ступенів свободи $f_1 = N - l - m_0 + 1 = 5$ та $f_2 = m_0 - 1 = 5$.

$$F = 2,336 < F(1 - q, f_1, f_2) = 5,05.$$

Рівняння регресії (8) перетворене до математичної моделі (9) в системі реальних факторів z_1, z_2, z_3 з урахуванням умов експерименту за формулами кодування факторів:

$$x_j = \frac{z_j - z_j^0}{\Delta z_j}: \quad x_1 = \frac{z_1 - 1100}{50}; \quad x_2 = \frac{z_2 - 750}{50}; \quad x_3 = \frac{z_3 - 4}{2}.$$

$$Y(\bar{z}) = -806,81 + 0,704z_1 + 0,521z_2 + 65,719z_3 + 0,002z_1z_2 - 0,068z_1z_3 + 0,021z_2z_3 - 7,209 \cdot 10^{-4}z_1^2 - 0,002z_2^2 - 0,897z_3^2, \quad (9)$$

де z_1 і z_2 – температури загартовування і старіння, відповідно, °C; z_3 – час старіння, год.

Рівняння регресії (9) дозволяє визначити тривалість часу Y до руйнування сплаву при всіх можливих комбінаціях значущих реальних чинників процесу.

Отриману математичну модель у вигляді рівняння (8) було використано для вирішення задачі оптимізації. Постановка задачі оптимізації була сформульована таким чином: визначити значення факторів, що впливають на тривалість часу до руйнування нікелевого сплаву, за якими тривалість часу до руйнування буде найбільшою.

Позначимо цільову функцію, як $R(x_1, x_2, x_3)$. Математична модель задачі оптимізації являє собою критерій оптимальності: $R(x_1, x_2, x_3) \rightarrow \max$.

$$R(x_1, x_2, x_3) = 29,008 + 7,337x_1 + 4,925x_2 - 1,213x_3 + 4,3x_1x_2 - 6,775x_1x_3 + 2,05x_2x_3 - 1,802x_1^2 - 3,994x_2^2 - 3,588x_3^2 \rightarrow \max. \quad (10)$$

Проаналізовано вплив кожного з факторів на час руйнування нікелевого сплаву $\hat{y}$ при середніх значеннях інших факторів. Графічний аналіз отриманого кодованого

рівняння регресії (рис. 3) показує, що в області експерименту не може бути досягнутий оптимум критерія оптимальності $R(x_1, x_2, x_3)$ внаслідок характеру зміни фактору x_1 .

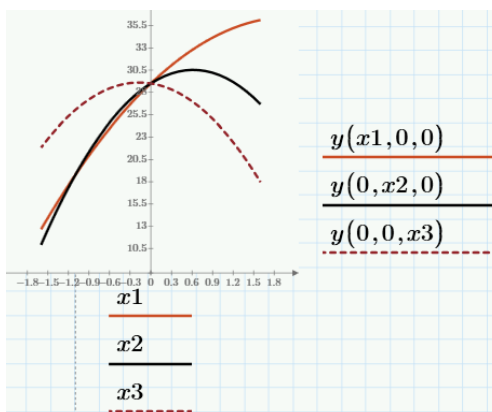


Рисунок 3 – Вплив на тривалість часу до руйнування нікелевого сплаву $\hat{y}$ температури загартовування x_1 , температури старіння x_2 , часу старіння x_3 при середніх значеннях інших факторів

Проаналізуємо критерій оптимальності $R(x_1, x_2, x_3)$ на наявність оптимуму відносно x_1, x_2, x_3 . Запишемо цільову функцію для зручності через коефіцієнти b_j :

$$R(x_1, x_2, x_3) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1^2 + b_8x_2^2 + b_9x_3^2. \quad (11)$$

Визначимо і прирівняємо 0 часткові похідні від $R(x_1, x_2, x_3)$ за змінними x_1, x_2, x_3 .

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial x_1} = b_1 + b_4x_2 + b_5x_3 + 2b_7x_1 = 0; \\ \frac{\partial R}{\partial x_2} = b_2 + b_4x_1 + b_6x_3 + 2b_8x_2 = 0; \\ \frac{\partial R}{\partial x_3} = b_3 + b_5x_1 + b_6x_2 + 2b_9x_3 = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Розв'язання системи рівнянь у матричній формі показує: отримана стаціонарна точка $x_1=1,79, x_2=-0,209, x_3=-2,168$ знаходиться за межами області експерименту (рис. 4).

$$A := \begin{bmatrix} 2 \cdot b_7 & b_4 & b_5 \\ b_4 & 2 \cdot b_8 & b_6 \\ b_5 & b_6 & 2 \cdot b_9 \end{bmatrix} \quad B := \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad X := A^{-1} \cdot B \quad X = \begin{bmatrix} 1.79 \\ -0.209 \\ -2.168 \end{bmatrix}$$

Рисунок 4 – Розв'язання системи рівнянь (12) у матричній формі

На рисунку 5 побудована поверхня цільової функції при середньому значенні фактору $x_1=0$ ($W23 = R(0, x_2, x_3)$).

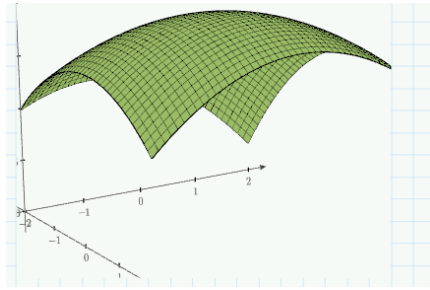


Рисунок 5 – Графік залежності критерія оптимальності від факторів x_2, x_3 при середньому значенні $x_1=0$ ($W23 = R(0, x_2, x_3)$)

Рисунок 6 показує вигляд поверхні цільової функції при середньому значенні фактору $x_3=0$ ($W12 = R(x_1, x_2, 0)$) в області експерименту.

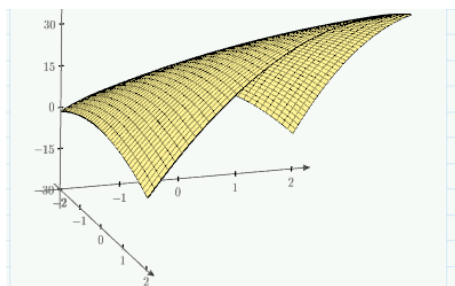


Рисунок 6 – Графік залежності критерія оптимальності від факторів x_1, x_2 при середньому значенні $x_3=0$ ($W12 = R(x_1, x_2, 0)$)

На рисунку 7 представлена поверхня цільової функції при середньому значенні фактору $x_2=0$ ($W13 = R(x_1, 0, x_3)$).

Графічний аналіз поверхні критерія оптимальності показує, що лише за заданих значень фактора $x_1=\text{const}$ (рис. 5) можна вирішити задачу оптимізації і визначити значення факторів x_2, x_3 , за яких критерій оптимальності набуває максимального значення.

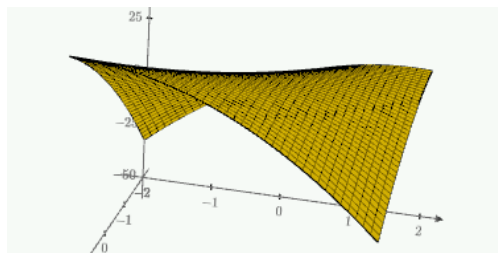


Рисунок 7 – Графік залежності критерія оптимальності від факторів x_1, x_3 при середньому значенні $x_2=0$ ($W13 = R(x_1, 0, x_3)$)

Для пошуку оптимуму цільової функції (11) за умовою $x_1=\text{const}$ обраний метод найшвидшого спуску. Цей метод є градієнтним і здійснює пошук в оптимальному напрямку. Алгоритм пошуку найшвидшого спуску має вигляд:

$$x_j^{(k+1)} = x_j^{(k)} \pm h^{(k)} \cdot \frac{\partial F(\bar{x}^{(p)})}{\partial x_j}, \quad j=1, \dots, n. \quad (13)$$

де $h^{(k)}$ – значення параметра h для k -го кроку; p – номер точки, в якій останній раз визначалися координати градієнта цільової функції. У формулі (13) знак «+» відповідає пошуку максимуму, знак «-» відповідає пошуку мінімуму.

Процес руху до оптимуму починають із початкової точки $\bar{x}^{(0)}$ та виконують у два етапи: 1 – визначення напрямку, 2 – виконання кроків в обраному напрямку.

На першому етапі в поточній точці руху обчислюють координати градієнта цільової функції, які дорівнюють відповідним частинним похідним. Тим самим визначається напрям найбільшої зміни функції в цій точці, а також розраховують значення цільової функції в точці.

На другому етапі виконується крок у напрямі градієнта (при пошуку максимуму), або антиградієнта (для відшукування мінімуму). У новій точці знов обчислюється значення цільової функції. Якщо в результаті кроку значення цільової функції покращилося, то виконується ще один крок у тому ж напрямі. Такі кроки продовжуються до тих пір, поки не відбудеться погіршення функції в наступній точці руху. Після цього повертаються до попередньої точки і починають виконувати дії відповідно до першого етапу руху: визначають координати градієнта в попередній точці, тобто обирають новий напрям руху з попередньої точки. Далі переходять до другого етапу. Процес є ітераційним до виконання критерія завершення пошуку оптимуму:

$$\sqrt{\sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial F(\bar{x}^{(k)})}{\partial x_j} \right)^2} \leq \varepsilon. \quad (14)$$

Методом найшвидшого спуску задача оптимізації розв'язана для трьох різних значень фактору x_1 : середнього рівня $x_1=0$, верхнього рівня $x_1=1$ і нижнього рівня $x_1=-1$.

Для значення фактору $x_1=0$, що відповідає реальному фактору $z_1=1100$ °C, критерій оптимальності:

$$R23(0, x_2, x_3) = b_0 + b_1 \cdot 0 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_1 x_2 + b_5 \cdot 0 \cdot x_3 + b_6 x_2 x_3 + b_1 \cdot 0^2 + b_8 x_2^2 + b_9 x_3^2 \rightarrow \max.$$

Оптимальне розв'язання: $R23_{\max}=30,526$ год.; $x_2=0,619$; $x_3=0,008$.

В реальному вимірі $R23_{\max}=30,529$ год.; $z_2=780,95$ °C; $z_3=4,06$ год.

На рисунку 8 наведений контурний графік з лініями рівня поверхні цільової функції та точкою максимуму при середньому значенні фактору $x_1=0$.

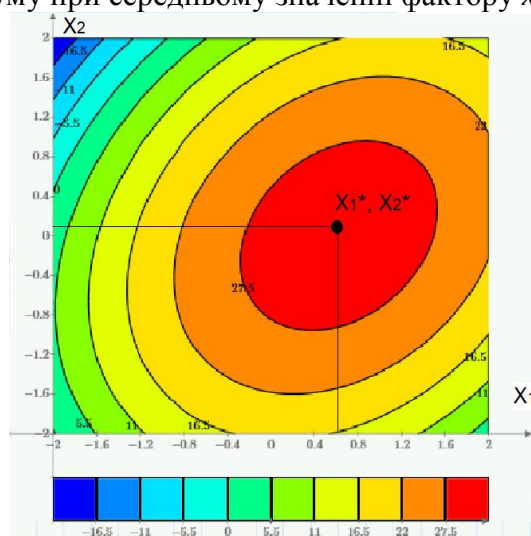


Рисунок 8 – Контурний графік залежності критерія оптимальності від факторів x_2, x_3 при середньому значенні $x_1=0$ ($R23 = R(0, x_2, x_3)$) та точка оптимуму x_2^*, x_3^*

Для значення фактору $x_1=1$, що відповідає реальному фактору $z_1=1150$ °C, критерій оптимальності:

$$R23(1, x_2, x_3) = b_0 + b_1 \cdot 1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_1 x_2 + b_5 \cdot 1 \cdot x_3 + b_6 x_2 x_3 + b_1 \cdot 1^2 + b_8 x_2^2 + b_9 x_3^2 \rightarrow \max.$$

Оптимальне розв'язання: $R23_{\max}=42,258$ год.; $x_2=0,938$; $x_3=0,846$.

В реальному вимірі $R23_{\max}=42,258$ год.; $z_2=796,9$ °C; $z_3=2,308$ год.

Для значення фактору $x_1=-1$, що відповідає реальному фактору $z_1=1050$ °C, критерій оптимальності:

$$R23(-1, x_2, x_3) = b_0 + b_1 \cdot (-1) + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_1 x_2 + b_5 \cdot (-1) \cdot x_3 + b_6 x_2 x_3 + b_1 \cdot (-1)^2 + b_8 x_2^2 + b_9 x_3^2 \rightarrow \max.$$

Оптимальне розв'язання: $R23_{\max}=22,362$ год.; $x_2=0,3$; $x_3=0,863$.

В реальному вимірі $R23_{\max}=22,362$ год.; $z_2=765$ °C; $z_3=5,726$ год.

Висновки. Під час дослідження було отримано математичну модель, яка відображає вплив факторів на тривалість часу до руйнування жароміцного нікелевого сплаву. Адекватність моделі встановлена за критерієм Фішера. Усі коефіцієнти моделі перевірені на значимість за критерієм Ст'юдента, й встановлено, що усі є значимими. Таким чином, математична модель другого порядку адекватно описує вплив температури загартовування, температури старіння, часу старіння на тривалість часу до руйнування одного з жароміцних нікелевих сплавів. За отриманою адекватною моделлю можна проводити обчислювальний експеримент, варіюючи значення вхідних факторів, кількісно отримувати значення вихідного параметру. Але визначення та прогноз відгуку за моделлю є справедливими лише у області зміни вхідних чинників. Метою оптимізації було визначення оптимальних значень факторів, за яких досягається максимальна тривалість часу до руйнування сплаву. Було виявлено, що критерій оптимальності не має оптимуму у системі трьох факторів в області їхньої зміни. Але характер зміни факторів x_2, x_3 – температури та часу старіння – дозволяє вирішити задачу оптимізації лише для конкретних значень фактору $x_1=\text{const}$ – температури загартовування. Методом найскорішого спуску задача оптимізації була розв'язана для значень фактору $x_1=0, x_1=1, x_1=-1$. Так, за температури загартовування $z_1=1150$ °C оптимальне рішення становить $R23_{\max}=42,258$ год.; $z_2=796,9$ °C; $z_3=2,308$ год. Застосування розробленої математичної моделі в задачах хімічної інженерії дозволяє підвищити ефективність технологічних процесів за рахунок прогнозування оптимальних параметрів без проведення надлишкових експериментів. Розроблена методика може бути інтегрована в системи автоматизованого проектування та управління хімічними реакторами і процесами термічної обробки матеріалів.

Література

1. Box G. E. P., Wilson K. B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B.* 1951.
2. Box G. E. P., Draper N. R. Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses. Wiley. 2007.
3. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. Wiley. 2017.

4. Hartmann K. Statistische Versuchsplanung und-auswertung in der Stoffwirtschaft. *Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie*. 1974.
5. Zaid H., Al-Sharify Z. T., Hamzah M. H., Rushdi S. Optimization of Different Chemical Processes Using Response Surface Methodology. A Review. *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 2022.Vol. 26, No. 6. P. 1-12.
6. Chen X., Pei Y., Wang X., Zhou W., Jiang L. Response Surface Methodology – Central Composite Design Optimization Sugarcane Bagasse Activated Carbon under Varying Microwave-Assisted Pyrolysis Conditions. *Processes*. 2024. Vol. 12, No. 3. Art. 497.
7. Perez J. V. D., Nadres E. T., Nguyen H. N. Response surface methodology as a powerful tool to optimize the synthesis of polymer-based graphene oxide nanocomposites for simultaneous removal of cationic and anionic heavy metal contaminants. *RSC Advances*. 2017. Vol. 7(30). P. 18480-18490.
8. Parulekar S. J. Numerical problem solving using Mathcad in undergraduate reaction engineering. *Chemical Engineering Education*. 2006.Vol. 40, No. 1. P. 14-23.
9. Статюха Г. О. Вступ до планування оптимального експерименту: навч. посіб. Київ : ІВЦ «Політехніка», 2011. 117 с.
10. Товажнянський Л. Л. Комп'ютерне моделювання у хімічній технології. Харків : НТУ «ХПІ», 2011. 606 с.
11. Ravindran A., Ragsdell K. M., Reklaitis G. V. Engineering optimization: methods and applications. 2nd ed., 2006. 681 p.
12. Хімельблау Д. Прикладне нелінійне програмування. Пер. з англ. 1975. 534 с.

Bibliography (transliterated)

1. Box G. E. P., Wilson K. B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*. 1951.
2. Box G. E. P., Draper N. R. Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses. Wiley. 2007.
3. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. Wiley. 2017.
4. Hartmann K. Statistische Versuchsplanung und-auswertung in der Stoffwirtschaft. *Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie*. 1974.
5. Zaid H., Al-Sharify Z. T., Hamzah M. H., Rushdi S. Optimization of Different Chemical Processes Using Response Surface Methodology. A Review. *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 2022.Vol. 26, No. 6. P. 1-12.
6. Chen X., Pei Y., Wang X., Zhou W., Jiang L. Response Surface Methodology – Central Composite Design Optimization Sugarcane Bagasse Activated Carbon under Varying Microwave-Assisted Pyrolysis Conditions. *Processes*. 2024. Vol. 12, No. 3. Art. 497.
7. Perez J. V. D., Nadres E. T., Nguyen H. N. Response surface methodology as a powerful tool to optimize the synthesis of polymer-based graphene oxide nanocomposites for simultaneous removal of cationic and anionic heavy metal contaminants. *RSC Advances*. 2017. Vol. 7(30). P. 18480-18490.
8. Parulekar S. J. Numerical problem solving using Mathcad in undergraduate reaction engineering. *Chemical Engineering Education*. 2006.Vol. 40, No. 1. P. 14-23.
9. Statiukha H. O. Vstup do planuvannia optymalnoho eksperymentu: navch. posib. Kyiv : IVTs «Politekhnik», 2011. 117 p.
10. Tovazhniansky L. L. Kompiuterne modeliuvannia u khimichnii tekhnolohii. Kharkiv : NTU «KhPI», 2011. 606 p.

11. Ravindran A., Ragsdell K. M., Reklaitis G. V. Engineering optimization: methods and applications. 2nd ed., 2006. 681 p.
12. Khimelblau D. Prykladne nelineiine prohramuvannia. Per. z anhl. 1975. 534 p.

УДК 62-93:66.08+519.6

Є. Д. Пономаренко, доцент, А. М. Миронов, канд. техн. наук, доцент,
Л. В. Соловей, ст. викл., М. В. Ільченко, канд. техн. наук, доцент,
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор, С. М. Биканов, канд. техн. наук, доцент,
Є. В. Краснокутський, канд. техн. наук, доцент

ІНТЕГРАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА RSM-ОПТИМІЗАЦІЇ ДО МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ У ГАЛУЗІ ХІМІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У статті представлено результати дослідження, присвяченого інтеграції методів математичного моделювання та методології оптимізації поверхні відгуку (RSM) у систему планування експерименту для задач хімічної інженерії із використанням сучасних програмних засобів. Розглянуто теоретичні засади побудови математичних моделей технологічних процесів і принципи реалізації статистичного планування експериментів для виявлення закономірностей між технологічними параметрами у хімічній інженерії. Обґрунтовано доцільність використання центрально-композиційних планів (ЦКП) для формування адекватних моделей другого порядку, що забезпечують можливість аналізу нелінійних взаємодій між факторами та прогнозування відгуку системи в широкому діапазоні умов.

Запропоновано методику інтеграції аналітичних моделей та RSM-оптимізації із застосуванням програмного середовища MathCAD Prime для проведення чисельних розрахунків, статистичної обробки результатів та побудови поверхонь відгуку. Наведено приклад моделювання процесу руйнування жароміцного нікелевого сплаву під впливом трьох технологічних параметрів термічної обробки: температури загартовування, температури старіння та часу старіння. Для аналізу даних реалізовано центрально-композиційний ротатбельний план другого порядку, який дозволив визначити значимі фактори, оцінити їх вплив за критерієм Стюдента та перевірити адекватність моделі за критерієм Фішера. Проведений аналіз показав, що в області зміни факторів цільова функція не має оптимуму. Однак аналіз характеру впливу факторів на вихідний параметр, показав, що можливо знайти оптимальне значення функції для фіксованих значень фактору $x_1 = \text{const}$. Отримано рівняння регресії, яке адекватно описує залежність тривалості до руйнування сплаву від досліджуваних параметрів. Оптимізацію розв'язку проведено за методом найскорішого спуску.

Показано, що одночасне використання статистичних та чисельних підходів забезпечує побудову достовірних моделей технологічних процесів, скорочує обсяг експериментальних робіт та створює підґрунтя для розробки цифрових двійників хіміко-технологічних систем. Розглянута методика може бути інтегрована у системи автоматизованого проектування та керування хіміко-технологічними процесами, що дасть змогу підвищити їхню ефективність та надійність.

Ключові слова: математичне моделювання, планування експерименту, хімічна інженерія, оптимізація, RSM, поверхні відгуку, адекватність, оптимум, чисельні методи.

Ye. D. Ponomarenko, A. M. Myronov, L. V. Solovei, M. V. Ilchenko, K. O. Gorbunov,
S. M. Bykanov, Ye. V. Krasnokutsky

INTEGRATION OF MATHEMATICAL MODELS AND RSM-OPTIMIZATION INTO EXPERIMENT PLANNING METHODS IN THE FIELD OF CHEMICAL ENGINEERING USING MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES

The article presents research results on integrating mathematical modeling and Response Surface Methodology (RSM) optimization into experimental design methods for chemical engineering applications using modern computational tools. The theoretical background of mathematical modeling of technological systems and the principles of statistical experiment planning are analyzed to identify the interrelations among process parameters. The use of central composite design (CCD) schemes for constructing second-order models is substantiated as an effective approach to account for nonlinear interactions of factors and to predict system response over wide operational ranges.

A unified methodology combining analytical modeling and RSM-optimization was developed with implementation in the MathCAD Prime software environment, enabling statistical processing, regression analysis, and visualization of response surfaces. The methodology was applied to model the durability of a heat-resistant nickel alloy depending on quenching temperature, aging temperature and aging time. A rotatable central composite plan was used to assess factor significance via the Student criterion and model adequacy using the Fisher criterion. The analysis showed that in the area of changing factors, the objective function does not have an optimum. However, an analysis of the nature of the influence of factors on the output parameter showed that it is possible to find the optimal value of the function for fixed values $x_1 = \text{const}$. The resulting second-order regression equation accurately represents the relationship between process variables and material failure time, allowing numerical optimization through the steepest descent algorithm.

The study demonstrates that combining mathematical modeling with statistical optimization ensures reliable prediction of technological behavior, reduces experimental effort, and supports digital twin creation for chemical-and-technological systems. The proposed approach enhances process design accuracy and can be effectively implemented in computer-aided engineering and control systems for chemical-and-technological processes, which will allow to increase their efficiency and reliability.

Keywords: mathematical modeling, experiment planning, chemical engineering, optimization, RSM, response surfaces, adequacy, optimum, numerical methods.

М. О. Сіробаба, аспірант, П. В. Карножицький, канд. техн. наук, доцент

ВПЛИВ ПРИСАДОК НА ВЛАСТИВОСТІ НАФТОВИХ БІТУМІВ: ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут», Харків

Ключові слова: бітуми, присадки, полімерні модифікатори, поверхнево-активні речовини, антиоксиданти, пластифікатори, наноматеріали, біополімери, вторинна сировина, асфальтобетон, довговічність покриття.

Вступ. Бітум є незамінним в'язучим матеріалом у дорожньому будівництві завдяки своїй здатності забезпечувати водостійкість, адгезію до мінеральних заповнювачів і пластичність у широкому діапазоні температур. Однак із підвищенням вимог до довговічності покриттів, експлуатаційної надійності та екологічності дорожніх матеріалів, звичайні бітуми дедалі частіше не задовольняють сучасні нормативи.

Одним із найперспективніших напрямів удосконалення властивостей бітуму є використання різноманітних присадок – органічних, неорганічних, полімерних або комплексних – які дозволяють регулювати реологічні, термічні та адгезійні характеристики в'язучого. Залежно від складу та механізму дії, присадки можуть покращувати стійкість бітуму до старіння, підвищувати його еластичність, знижувати температуру укладання, а також сприяти кращому зчепленню з мінеральним скелетом асфальтобетону.

Класифікація присадок до бітуму. Полімерні присадки. Серед полімерних модифікаторів бітуму особливе місце посідають еластомери типу СБС (стирол-бутадієн-стирол), які формують нове покоління модифікованих в'язучих для асфальтобетонних сумішей. Завдяки унікальній структурі, СБС-полімери значно покращують експлуатаційні характеристики бітуму, підвищуючи його температуру розм'якшення, зсувостійкість, опір утворенню колії, а також тріщиностійкість і здатність до відновлення деформацій під дією вагових навантажень. Важливо, що СБС-модифікований бітум зберігає технологічну сумісність із стандартними процесами приготування гарячих асфальтобетонних сумішей, не потребує змін температурного режиму. Крім того, такі модифікатори покращують адгезію до мінеральних заповнювачів, сприяють підвищенню загальної міцності покриття, розширюють інтервал пластичності, забезпечують стабільність при зберіганні та мають зручну форму подачі – як у вигляді гранул, так і шляхом безпосереднього дозування в асфальтозмішувальну установку. Середня рекомендована концентрація СБС-присадки становить 7–15 % від маси бітуму, що дозволяє досягти оптимального балансу між покращенням властивостей і економічною доцільністю. У підсумку, СБС-модифікатори відіграють ключову роль у підвищенні довговічності дорожнього покриття та стійкості до кліматичних і механічних навантажень.

Ще одним поширеним типом полімерних присадок до бітуму є етиленвінілацетатні сополімери (ЕВА, EVA – Ethylene Vinyl Acetate). Ці термопластичні матеріали поєднують властивості еластомерів та пластиків, що дозволяє ефективно покращувати термічну стабільність і технологічність асфальтобетонних в'язучих. ЕВА-

модифікатори значно підвищують температуру розм'якшення, покращують стійкість до утворення колій, а також збільшують гнучкість покриття при низьких температурах. Їхнє використання особливо доцільне у регіонах із континентальним кліматом, де асфальтобетон зазнає значних температурних коливань. Важливою перевагою ЕВА є сумісність з нафтовим бітумом без потреби використання дорогих активаторів або додаткових стабілізаторів. Завдяки гарній оброблюваності, ЕВА може легко вводитися як безпосередньо в асфальтозмішувальну установку, так і попередньо змішуватися із бітумом у процесі модифікації на виробництві.

Поверхнево-активні речовини (ПАР). Серед поверхнево-активних речовин (ПАР), які застосовуються як модифікатори бітуму, особливу увагу привертають катіонні добавки, що покращують адгезію між бітумом і мінеральними матеріалами. Згідно з проведеними дослідженнями [1], ПАР-добавки типу АДБІТ-Р та УДОМ-4 у концентрації 0,2–0,4 % сприяють значному підвищенню зчеплення бітуму з інертними заповнювачами. Зокрема, адгезійна здатність з щебенем зросла на 2–5 балів, а зі склом – до 100 % покриття поверхні. Крім того, зазначені ПАР підвищували динамічну в'язкість і уповільнювали процес старіння бітуму: за результатами випробувань після RTFOT-старіння спостерігалось збільшення залишкової penetрації та зниження зміни температури розм'якшення.

Водночас встановлено, що ефективність катіонних присадок може знижуватись під дією високих технологічних температур, особливо після багаторазового нагрівання. Проте застосування вищих концентрацій ПАР дозволяє зменшити цей негативний вплив, зберігаючи позитивний ефект на адгезійні характеристики модифікованого в'язучого. Таким чином, ПАР-присадки є перспективними для створення бітумів із покращеними зчипними властивостями та підвищеною експлуатаційною надійністю.

Антиоксиданти. Одним із ефективних підходів до підвищення стійкості бітуму до старіння є застосування антиоксидантних присадок, які уповільнюють процеси термоокислювальної деградації. Як зазначається в статті, опублікованій у *Advances in Materials Science and Engineering* (2015) [2], включення до бітуму полімерів, посилені антиоксидантами, дозволяє покращити його експлуатаційні характеристики як до, так і після штучного старіння.

Результати дослідження показали, що модифіковані зразки мали *нижчу критичну температуру жорсткості ($G/\sin\delta$)** після RTFOT-старіння – на 3–5 °C менше порівняно з контрольними зразками без присадки, що свідчить про меншу крихкість і більшу тріщиностійкість в умовах низьких температур. Крім того, показник в'язкості при 60 °C для модифікованого бітуму залишався в допустимих межах, що зберігало його технологічність.

У ході випробувань асфальтобетонних сумішей було встановлено, що опір колютворенню (rutting resistance) покращився на 15–20 %, а відношення міцності до розтягу після впливу води (TSR) зросло з 71 % до 86 %, що вказує на зниження чутливості до вологості. Також було зафіксовано помірне подовження втомного ресурсу, що свідчить про підвищену довговічність покриття при дії циклічних навантажень. Таким чином, автори дослідження підкреслюють доцільність використання антиоксидантів у якості модифікаторів бітуму, особливо для підвищення експлуатаційної надійності покриттів у складних кліматичних умовах.

Пластифікатори. Одним із напрямів регулювання реологічних властивостей дорожнього бітуму є застосування пластифікаторів, які забезпечують зниження в'язкості, покращення оброблюваності та збереження еластичності в'язучого при низьких температурах. До найпоширеніших типів пластифікуючих добавок належать важкі нафтові залишки (такі як вакуумний газойль, екстракти селективного очищення – ТСО), технічні масла та рецикльовані матеріали, зокрема відпрацьовані мастила або залишки полімерної продукції.

З огляду на доступність та економічну доцільність, пластифікатори часто застосовуються не лише як самостійні модифікатори, але й у композиціях з полімерними або поверхнево-активними добавками, де виконують роль носія, стабілізатора або активатора взаємодії між фазами. Таким чином, пластифікатори відіграють важливу роль у формуванні потрібного балансу між технологічністю асфальтобетонної суміші та її довговічністю в умовах експлуатації.

Антипінні та антифрикційні добавки. Антипінні добавки використовуються для запобігання надмірному утворенню піни в бітумі під час його нагрівання, перемішування та транспортування. Піна може утворюватися внаслідок наявності вологи, газів або певних поверхнево-активних домішок, що призводить до нерівномірного розподілу бітуму, зниження якості зчеплення з мінеральним заповнювачем та ускладнення технологічних процесів. Найчастіше як антипінні агенти застосовують силіконові емульсії, поліалкілсилоксани, а також мінеральні та синтетичні масла, які знижують поверхневий натяг і сприяють швидкому руйнуванню бульбашок повітря.

Антифрикційні добавки призначені для зменшення тертя між частинками суміші під час укладання та ущільнення асфальтобетону, що дозволяє знизити енерговитрати та підвищити однорідність шару. У ролі антифрикційних присадок часто використовують органічні модифікатори на основі жирних кислот, восків (наприклад, Fischer–Tropsch восків), а також спеціальних полімерів, які утворюють тонку плівку на поверхні зерен заповнювача. Такі добавки можуть одночасно виконувати функцію пластифікаторів, покращуючи оброблюваність бітуму та знижуючи температуру його укладання.

Застосування антипінних та антифрикційних добавок є доцільним переважно на етапах виробництва та транспортування гарячих асфальтобетонних сумішей, а також при впровадженні технологій теплового асфальту (WMA), де зниження температури приготування і укладання вимагає додаткового контролю реологічних та поверхневих властивостей в'язучого.

Механізм дії присадок. Фізична модифікація структури колоїдної системи. Бітум є складною колоїдною системою, у якій асфальтени перебувають у дисперсному стані, стабілізовані в олійно-смолистій матриці (малтенах). Додавання модифікуючих присадок може змінювати фізичну організацію цієї системи без прямої хімічної реакції з її компонентами. Така модифікація відбувається, коли присадка розчиняється або рівномірно диспергується у бітумі, впливаючи на просторову структуру та взаємне розташування асфальтенових агрегатів.

Наприклад, полімерні модифікатори (СБС, ЕВА, поліетилен) формують у бітумі додаткову тривимірну сітку, яка обмежує рух малтенів і підвищує еластичність матеріалу. Пластифікатори зменшують міжмолекулярні взаємодії, збільшуючи рухливість дисперсної фази та знижуючи в'язкість. ПАР-добавки змінюють міжфазну напругу, спри-

яючи кращому змочуванню мінеральних заповнювачів та рівномірному розподілу бітуму по їх поверхні.

Фізична модифікація структури колоїдної системи, на відміну від хімічної, є зворотним процесом — при видаленні присадки або зміні температури структура може частково повертатися до початкового стану. Саме тому вибір типу і концентрації присадки має бути оптимізованим, щоб забезпечити довготривале збереження бажаних властивостей бітуму під час експлуатації дорожнього покриття.

Хімічна взаємодія з асфальтенами та мальтенами. На відміну від фізичної модифікації, хімічна взаємодія присадок з компонентами бітуму передбачає утворення нових хімічних зв'язків або перебудову існуючих молекулярних структур у колоїдній системі. Асфальтени — це високомолекулярні поліциклічні сполуки з великою кількістю ароматичних кілець і полярних функціональних груп, тоді як мальтени складаються переважно з насичених і ароматичних вуглеводнів, смол та масел. Деякі присадки здатні вступати у реакції з цими компонентами, змінюючи їхню молекулярну масу, полярність і здатність до агрегації.

Наприклад, антиоксиданти можуть реагувати з вільними радикалами, що утворюються під час окиснення мальтенів, запобігаючи утворенню нових полярних смол та асфальтенів, які підвищують жорсткість бітуму. ПАР-добавки з активними функціональними групами (аміни, аміді, органофосфати) здатні формувати міцні зв'язки з полярними ділянками асфальтенів, стабілізуючи дисперсну фазу та покращуючи адгезію до мінеральних поверхонь. У випадку полімерних модифікаторів можливі реакції зшивання між макромолекулами полімеру та функціональними групами смолисто-асфальтенової фази, що призводить до утворення більш стійкої та еластичної структури.

Хімічна взаємодія забезпечує більш тривалий і стабільний ефект модифікації, оскільки утворені зв'язки не руйнуються при зміні температури або в процесі механічного впливу. Проте цей підхід вимагає ретельного підбору присадки, щоб уникнути небажаних побічних реакцій, які можуть знизити довговічність бітуму або погіршити його сумісність з іншими компонентами асфальтобетонної суміші.

Методи оцінки ефективності присадок. Вплив модифікуючих присадок на властивості бітуму та асфальтобетонних сумішей оцінюють за допомогою комплексу стандартних і спеціалізованих випробувань, спрямованих на визначення змін консистенції, теплостійкості, реологічних характеристик та механічної міцності.

Одним із базових параметрів є пенетрація — глибина проникнення стандартної голки в бітум під дією постійного навантаження при температурі +25 °C. Цей показник характеризує консистенцію матеріалу, а його зміна після введення присадки свідчить про зміну твердості та пластичності в'язучого. Іншим важливим показником є температура розм'якшення, що визначається методом КіК (кільце й куля) та відображає теплостійкість бітуму: підвищення цього значення зазвичай вказує на покращення деформаційної стійкості при високих температурах.

З графіку на рисунку 1 показано, як температура розм'якшення значно зростає зі збільшенням вмісту СБС-модифікатора, підтверджуючи фізичну модифікацію структури в'язкої матриці бітуму. Як видно на графіку, температура розм'якшення зростає зі збільшенням вмісту СБС, особливо в межах 5–12 % модифікатора [3–5].

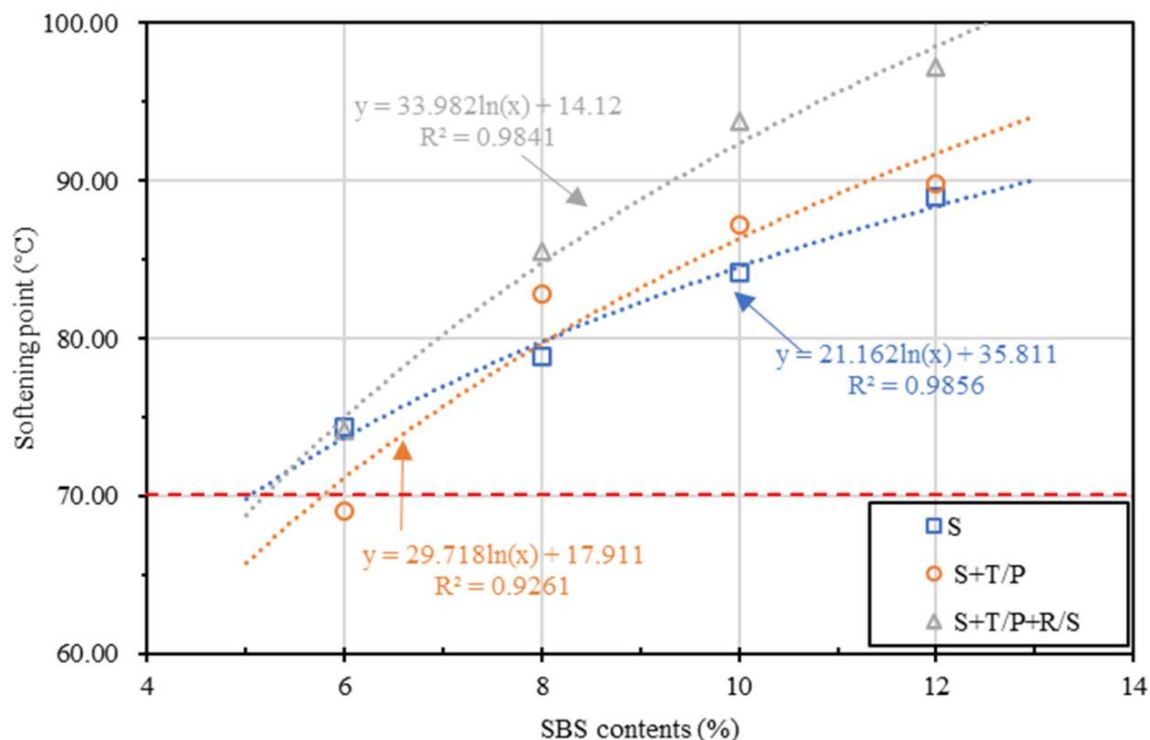


Рисунок 1 – Графік залежності температури розм'якшення від вмісту СБС-модифікатора

Для оцінки довговічності та стійкості до старіння застосовують методи RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) та PAV (Pressure Aging Vessel). RTFOT моделює короткострокове старіння, яке відбувається під час приготування та укладання асфальтобетонної суміші, тоді як PAV імітує довготривале старіння під впливом кліматичних факторів протягом декількох років експлуатації. Порівняння властивостей бітуму до та після цих тестів дозволяє оцінити ефективність присадок у запобіганні окисненню та втраті еластичності.

Реологічні властивості бітуму визначають шляхом вимірювання в'язкості. Використання ротаційних віскозиметрів типу Brookfield дозволяє оцінити технологічність в'язучого при робочих температурах, тоді як динамічний зсувний реометр (DSR) дає можливість аналізувати комплексний модуль (G^*) і фазовий кут (δ) у широкому діапазоні температур і частот, що особливо важливо для оцінки опору колієутворенню та втомним руйнуванням.

Для перевірки впливу присадок безпосередньо на асфальтобетонну суміш застосовують тест Маршалла, який визначає стабільність і пластичність зразків, та випробування на непряме розтягування (Indirect Tensile Strength, ITS), яке характеризує водостійкість і міцність при низьких температурах. У деяких випадках додатково проводять випробування на опір колієутворенню (Hamburg Wheel Tracking Test) та втомну витривалість (Four Point Bending Beam Test).

Комплексне використання цих методів дозволяє не лише кількісно оцінити вплив присадок на властивості бітуму, але й визначити оптимальні концентрації модифікаторів та їхню ефективність у конкретних кліматичних та експлуатаційних умовах.

Сучасні тренди. Розвиток дорожнього будівництва та зростання вимог до довговічності, екологічності та економічної ефективності дорожніх покриттів стимулюють активний пошук нових рішень у сфері модифікації бітумів. Традиційні присадки, що

використовуються десятиліттями, поступово доповнюються інноваційними матеріалами та технологіями, здатними забезпечити кращу адаптацію в'язучого до екстремальних кліматичних умов, інтенсивного транспортного навантаження та вимог сталого розвитку.

У таблиці 1 нижче наведено узагальнення сучасних трендів модифікування бітумів.

Таблиця 1 – Сучасні тренди модифікації бітумів різними присадками

№	Тип присадки / підхід	Основні результати
1	Полімерні модифікатори, дослідження старіння	Використано FTIR-аналіз і реологічні випробування для оцінки змін у полімер-модифікованому бітумі при RTFOT/PAV старінні. Показано зростання кількості карбонільних груп після окиснення, що корелює зі зменшенням еластичності. Запропонована методика дозволяє кількісно прогнозувати втрату властивостей протягом експлуатації.
2	Окислений графен (GO) + поліуретан (PU)	При додаванні 0,5–1,0 % GO до PU-модифікованого бітуму відзначено покращення високотемпературної стійкості (зростання $G^*/\sin \delta$ на 25–30 %), зниження накопиченої деформації в Hamburg Wheel Tracking Test на 40 % і підвищення опору старінню (менше зниження пенетрації після PAV).
3	SBS + порошок кісток + відпрацьована олія	Додавання 3–5 % порошку кісток та 5 % відпрацьованої олії у поєднанні з 4 % SBS призвело до зростання показників PG (з PG 64-22 до PG 70-28). Такі зразки показали збільшення втомної витривалості (на ~35 %) та покращену еластичність при низьких температурах.
4	Графенові нанопластики (різні розміри)	При концентрації 0,3–0,7 % GNP реєстрували значне підвищення комплексу G^* на високих температурах. Великі нанопластики (5–10 μm) дали приріст стійкості до колієутворення на 20–25 % порівняно з дрібними. Встановлено, що форма і розмір нанопластин прямо впливають на дисперсію та ефективність.
5	SBR + графенові матеріали	Композиція SBR (4 %) з графеном (0,5 %) підвищила rutting factor ($G^*/\sin \delta$) у середньому на 45 %. Водночас стабільність при зберіганні залишалася в межах стандартів, а низькотемпературні показники (ΔT_c) не погіршилися. Такі системи показали баланс між високотемпературною стійкістю й еластичністю.

Наноприсадки. Сучасні дослідницькі тренди у сфері модифікації бітуму активно звертаються до нанотехнологічних добавок, які завдяки своїй дуже малій розмірності та великій питомій поверхні здатні суттєво поліпшувати механічні, реологічні та довговічні характеристики дорожніх покриттів. Такі наноприсадки, як наноглина або графен-набери, демонструють багатофункціональну ефективність завдяки фізичній взаємодії з бітумною матрицею, що відкриває перспективи для створення високоміцних, стійких до старіння і самовідновних асфальтобетонних матеріалів.

Дослідження показують, що наноглина суттєво покращує жорсткість бітуму, знижує вразливість до деформацій і покращує опір старінню завдяки утворенню в структурі тонких, добре розподілених шарів, які підсилюють колоїдну систему бітуму [6]. Водночас графенові нанопластили (GNP) (рисунок 2) у концентрації близько 0,5 % (від маси бітуму) продемонстрували значне підвищення жорсткого модуля при температурі +5 °C, +25 °C та +40 °C – на 15 %, 36 % та 54 % відповідно, а довговічність (fatigue life) асфальтобетону збільшилась на 55 % у порівнянні з традиційними сумішами. До того ж показник міцності при розтягу (ITS) зріс на 23 % у сухому стані й на 38 % – у вологому, що свідчить про зниження чутливості до вологи [7].

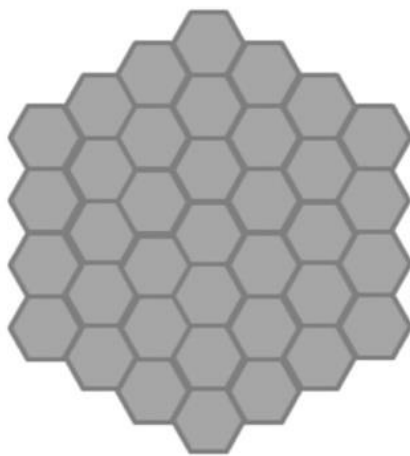


Рисунок 2 – Графенова нанопластили (GNP)

Біополімери та вторинна сировина. Використання біополімерів і вторинної сировини у модифікації бітумів є одним із сучасних напрямів розвитку дорожнього будівництва, що поєднує підвищення експлуатаційних властивостей покриття з екологічною доцільністю. Біополімери, такі як лігнін, крохмаль, целюлозні волокна або природні смоли, здатні частково замінювати традиційні нафтохімічні полімери. Вони покращують адгезію, знижують температуру укладання та підвищують стійкість покриття до утворення тріщин при низьких температурах.

Вторинна сировина, наприклад, подрібнені поліетиленові відходи, поліпропілен, гумова крихта з відпрацьованих шин, або навіть відпрацьовані мастила, широко застосовується як пластифікуючий чи зміцнювальний компонент. Такі модифікатори дозволяють зменшити собівартість асфальтобетонних сумішей і водночас частково вирішують проблему утилізації відходів. Дослідження показують, що додавання гумової крихти у кількості 10–20 % від маси бітуму здатне суттєво підвищити опір колієутворенню та довговічність покриття, тоді як поліетиленові чи поліпропіленові відходи сприяють збільшенню теплостійкості та зниженню водочутливості асфальтобетону [8].

Висновки. Огляд літератури та сучасних досліджень свідчить, що присадки до бітуму відіграють ключову роль у підвищенні довговічності та експлуатаційних властивостей дорожніх покриттів. Кожен клас модифікаторів має власний механізм дії, основні переваги, недоліки та сфери найбільшої ефективності. Характеристику кожного класу присадок, які було розглянуто, наведено, у таблиці 2 нижче.

Таблиця 2 – Характеристики різних типів присадок

Клас присадок	Основні переваги	Обмеження / недоліки	Сфера найбільшої ефек- тивності
Полімерні (СБС, ЕВА, ПЕ)	Підвищують еластичність і тріщиностійкість Збільшують інтервал пластичності Покращують стійкість до колієутворення	Висока вартість Потреба в ретельному дозуванні	Інтенсивний рух, холодні та спекотні кліматичні умови
ПАР (катіонні, аміни, фосфати)	Покращують адгезію з мінеральним матеріалом Знижують водочутливість	Обмежена ефективність при високих температурах Можливість зниження ефекту з часом	Регіони з високою вологістю, покриття з гранітними заповнювачами
Антиоксиданти (феноли, аміни)	Уповільнюють окиснення Підвищують довговічність покриття Зменшують крихкість при низьких температурах	Вартість Можливість часткової втрати ефективності при тривалому старінні	Асфальти у кліматичних зонах з різкими перепадами температур
Пластифікатори (ТСО, масла, відпрацьовані мастила)	Знижують в'язкість Зменшують температуру укладання Покращують технологічність	Ризик несумісності Можливість розшарування	Виробництво теплового асфальту, економічно обмежені проекти
Антипінні та антифрикційні добавки	Запобігають утворенню піни Зменшують тертя при ущільненні Підвищують однорідність суміші	Використання здебільшого обмежене технологічним етапом виробництва	Гарячі та теплі асфальтобетонні суміші, заводські процеси
Наноматеріали (наноглина, графен)	Покращують жорсткість і міцність Підвищують опір старінню та волозі Дозволяють зменшити кількість традиційних полімерів	Висока вартість Потреба у спеціальних технологіях диспергування	Високонавантажені автомагістралі, інноваційні проекти
Біополімери та вторинна сировина	Екологічність Зменшення собівартості Переробка відходів	Варіативність якості вторинних матеріалів Потреба у стандартизації	Проекти із фокусом на сталість і «зелені» технології

Література

1. Ковальчук В. І., Поліщук Ю. О. Вплив поверхнево-активних речовин на адгезійні властивості дорожніх бітумів. *Автошляховик України*. 2018. № 2. С. 28–33. URL: https://nidi.org.ua/files/upload/Автошляховик%20%20України%20_2018%20№%202.pdf.
2. Dessouky S., Ilias M., Park D.W., Kim I. T. Influence of antioxidant-enhanced polymers in bitumen rheology and bituminous concrete mixtures mechanical performance. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2015. Iss.1. ID статті 214585. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/214585>.
3. Al-Hadidy A. I., Yi-Qiu T., Al-Mashakbeh A. Effects of used lubricating oil and crumb rubber on properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 2017. No. 152. P. 891–902.
4. Галкін А. В., Пиріг Я. І. Огляд бітумних в'язучих, що використовуються в Україні. *Дороги і мости*. 2021. №. 23. С. 60–75.
5. Li Y., Jiang G., Yan S., Feng J., Li D. Performance and mechanism of high-viscosity and high-elasticity bitumen (HVE-MB) modified with five additives. *Sustainability*. 2023. No. 15(19), P. 14089.
6. Arabani M., Mirabdolazimi S. M., Hamed G. H. Sustainable asphalt pavements with nanoclay: Laboratory evaluation of fatigue and rutting performance. *Sustainability*. 2020. No. 12(19). P. 8044.
7. Yusoff N. I. M., Bakar W. A., Hainin M. R., Airey G. D. Evaluation of the effects of graphene-nanoplatelets on the rutting, fatigue performance, and moisture sensitivity of hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*. 2023. No. 392. P. 131918.
8. Pérez I., Pasandín A. R., Pais J. C., Pereira P. A. A. Use of lignin biopolymer from industrial waste as bitumen extender for asphalt mixtures. 2019.
9. Saady M., Guirguis M., Saeed A., Elshenawy A., Elkaramany F., Dawoud N., Darwish M., AbouZeid M. Crumb rubber (CR) and low-density polyethylene (LDPE)-modified asphalt pavement assessment: A mechanical, environmental, and life cycle cost analysis study. *Sustainability*. 2025. No. 17(13). P. 5785.
10. Werkovits C., Pahnke M., Mirwald J., Schirp C. Chemical changes in polymer-modified bitumen during natural and laboratory ageing: A combined analytical study. *Fuel*. 2025. No. 380. P. 127466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.127466>.
11. Guo Y., Li H., Wang L., Zhang J. Synergistic effect of graphene oxide and polyurethane on the rheological properties and aging resistance of asphalt binder. *Scientific Reports*. 2025. No. 15. P. 4567. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86078-9>.
12. Almusawi A. A., Mohammed A. H., Hameed A. A., Kadhim A. Multi-component modification of asphalt binders using SBS, animal bone powder and waste cooking oil. *Buildings*. 2025. No. 15(3). P. 306. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15030306>.
13. Almashaqbeh H. A., Qasem R., Al-Mistarehi A. H. Effect of graphene nanoplatelet size on high-temperature performance of asphalt binder. *Materials and Structures*. 2024. No. 57. P. 302. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02302-4>.
14. Wang Y., Liu Z., Chen H., Zhang P. Storage stability and rutting resistance of SBR/graphene modified asphalt binders. *International Journal of Pavement Engineering*. 2025. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2025.2523397>.

Bibliography (transliterated)

1. Kovalchuk V. I., Polishchuk Yu. O. Vplyv poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn na adheziini vlastyvoli dorozhnikh bitumiv. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. 2018. № 2. P. 28–33. URL: https://nidi.org.ua/files/upload/Avtoshliakhovyk%20%20Ukrainy%20_2018%20№%20.
2. Dessouky S., Ilias M., Park D.W., Kim I. T. Influence of antioxidant-enhanced polymers in bitumen rheology and bituminous concrete mixtures mechanical performance. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2015. Iss.1. ID статті 214585. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/214585>.
3. Al-Hadidy A. I., Yi-Qiu T., Al-Mashakbeh A. Effects of used lubricating oil and crumb rubber on properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 2017. No. 152. P. 891–902.
4. Halkin A. V., Pyrih Ya. I. Ohliad bitumnykh viazhuchykh, shcho vykorystovuiutsia v Ukraini. *Dorohy i mosty*. 2021. № 23. P. 60–75.
5. Li Y., Jiang G., Yan S., Feng J., Li D. Performance and mechanism of high-viscosity and high-elasticity bitumen (HVE-MB) modified with five additives. *Sustainability*. 2023. No. 15(19), P. 14089.
6. Arabani M., Mirabdolazimi S. M., Hamed G. H. Sustainable asphalt pavements with nanoclay: Laboratory evaluation of fatigue and rutting performance. *Sustainability*. 2020. No. 12(19). P. 8044.
7. Yusoff N. I. M., Bakar W. A., Hainin M. R., Airey G. D. Evaluation of the effects of graphene-nanoplatelets on the rutting, fatigue performance, and moisture sensitivity of hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*. 2023. No. 392. P. 131918.
8. Pérez I., Pasandín A. R., Pais J. C., Pereira P. A. A. Use of lignin biopolymer from industrial waste as bitumen extender for asphalt mixtures. 2019.
9. Saady M., Guirguis M., Saeed A., Elshenawy A., Elkaramany F., Dawoud N., Darwish M., AbouZeid M. Crumb rubber (CR) and low-density polyethylene (LDPE)-modified asphalt pavement assessment: A mechanical, environmental, and life cycle cost analysis study. *Sustainability*. 2025. No. 17(13). P. 5785.
10. Werkovits C., Pahnke M., Mirwald J., Schirp C. Chemical changes in polymer-modified bitumen during natural and laboratory ageing: A combined analytical study. *Fuel*. 2025. No. 380. P. 127466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.127466>.
11. Guo Y., Li H., Wang L., Zhang J. Synergistic effect of graphene oxide and polyurethane on the rheological properties and aging resistance of asphalt binder. *Scientific Reports*. 2025. No. 15. P. 4567. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86078-9>.
12. Almusawi A. A., Mohammed A. H., Hameed A. A., Kadhim A. Multi-component modification of asphalt binders using SBS, animal bone powder and waste cooking oil. *Buildings*. 2025. No. 15(3). P. 306. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15030306>.
13. Almashaqbeh H. A., Qasem R., Al-Mistarehi A. H. Effect of graphene nanoplatelet size on high-temperature performance of asphalt binder. *Materials and Structures*. 2024. No. 57. P. 302. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02302-4>.
14. Wang Y., Liu Z., Chen H., Zhang P. Storage stability and rutting resistance of SBR/graphene modified asphalt binders. *International Journal of Pavement Engineering*. 2025. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2025.2523397>.

УДК 665.775:66.095.26

М. О. Сіробаба, аспірант, П. В. Карножицький, канд. техн. наук, доцент

**ВПЛИВ ПРИСАДОК НА ВЛАСТИВОСТІ НАФТОВИХ БІТУМІВ:
ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Стаття присвячена систематичному огляду сучасних підходів до модифікації нафтових бітумів різними класами присадок з метою підвищення довговічності та надійності дорожніх покриттів (УДК 665.775:66.095.26). Розглянуто класифікацію та функціональне призначення основних груп добавок: полімерні модифікатори (СБС, ЕВА, ПЕ), поверхнево-активні речовини (ПАР), антиоксиданти, пластифікатори, а також технологічні антипінні та антифрикційні агенти. Окрему увагу приділено інноваційним трендам — наноматеріалам (наноглина, графен) та використанню біополімерів і вторинної сировини.

Показано, що полімерні присадки формують у в'язучому просторову сітку, яка одночасно підвищує температурну стійкість, еластичність і тріщиностійкість без істотних змін стандартних температурних режимів приготування сумішей. Для ПАР наведено експериментальні дані про зростання адгезії бітум–мінеральний матеріал за малих дозувань (0,2–0,4 %), стабілізацію в'язкості та стримування термоокиснювального старіння. Антиоксиданти продемонстрували зниження критичної температури жорсткості після RTFOT/PAV, покращення параметрів опору колієутворенню та водочутливості (зростання TSR), що підтверджує їхню ефективність у зниженні швидкості деградації в'язучого. Пластифікатори (ТСО, вакуумний газойль, технічні масла та рецикляти) забезпечують зменшення в'язкості та зниження температур укладання (на 10–15 °С за дозувань 5–15 %), за умови сумісності з колоїдною структурою бітуму.

Розділ про механізми дії зіставляє фізичну модифікацію (розподіл, диспергування, зниження міжфазної напруги) з хімічними взаємодіями (зв'язування радикалів антиоксидантами, утворення міцних зв'язків ПАР з полярними фрагментами асфальтенів, можливе часткове зшивання полімерів). Методичний блок охоплює ключові випробування: penetрацію, температуру розм'якшення (кільце–куля), в'язкість (Brookfield, DSR), старіння (RTFOT/PAV), а також тести сумішей (Marshall, ITS, Hamburg), і містить приклад графічної залежності «вміст СБС — температура розм'якшення».

У блоці «Сучасні тренди» узагальнено результати новітніх досліджень щодо наноглини та графенових нанопластин (підвищення G^* , опір колієутворенню, покращення втомної витривалості), а також застосування біополімерів і вторинної сировини як шляху до зменшення вуглецевого сліду та вартості матеріалів. Завершальні висновки підкреслюють доцільність багатокомпонентної модифікації та необхідність стандартизації сумісності інноваційних присадок із рециклованими компонентами.

Ключові слова: бітуми, присадки, полімерні модифікатори, поверхнево-активні речовини, антиоксиданти, пластифікатори, наноматеріали, біополімери, вторинна сировина, асфальтобетон, довговічність покриття.

M. O. Sirobaba, P. V. Karnozhytskyi

INFLUENCE OF ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF PETROLEUM BITUMENS: A REVIEW OF CURRENT RESEARCH

This article presents a systematic review of contemporary approaches to modifying petroleum bitumens with various classes of additives in order to enhance the durability and reliability of road pavements (UDC 665.775:66.095.26). The classification and functional roles of the main groups of additives are considered: polymer modifiers (SBS, EVA, PE), surface-active agents (surfactants), antioxidants, plasticizers, as well as process-oriented antifoaming and antifriction agents. Particular attention is paid to innovative trends – nanomaterials (nanoclay, graphene) and the use of biopolymers and recycled raw materials.

It is shown that polymer additives form a spatial network within the binder that simultaneously increases thermal stability, elasticity, and crack resistance without significant changes to standard hot-mix production temperatures. For surfactants, experimental data demonstrate increased adhesion at the bitumen–mineral interface at low dosages (0.2–0.4 %), viscosity stabilization, and suppression of thermo-oxidative aging. Antioxidants reduce the critical stiffness temperature after RTFOT/PAV, improve rutting resistance and moisture susceptibility (higher TSR), confirming their effectiveness in slowing binder degradation. Plasticizers (selective extraction oils – TSO, vacuum gas oil, technical oils, and recyclates) reduce viscosity and lower laying temperatures (by 10–15 °C at 5–15 % dosages), provided compatibility with the bitumen’s colloidal structure is ensured.

The mechanisms section contrasts physical modification (dispersion, distribution, reduction of interfacial tension) with chemical interactions (radical scavenging by antioxidants, formation of strong bonds between surfactants and polar asphaltene fragments, and potential partial crosslinking of polymers). The methodological block covers key tests: penetration, softening point (ring-and-ball), viscosity (Brookfield, DSR), aging (RTFOT/PAV), as well as mixture tests (Marshall, ITS, Hamburg), and includes an example of a graphical dependence “SBS content vs. softening point.”

The “Modern Trends” section summarizes recent findings on nanoclay and graphene nanoplatelets (increases in G^* , improved rutting resistance, enhanced fatigue performance), as well as on biopolymers and secondary raw materials as a pathway to reducing carbon footprint and material costs. The concluding remarks emphasize the advisability of multicomponent modification and the need to standardize compatibility of innovative additives with recycled constituents.

Keywords: bitumen, additives, polymer modifiers, surface-active agents, antioxidants, plasticizers, nanomaterials, biopolymers, secondary raw materials, asphalt concrete, pavement durability.

М. О. Харченко, канд. техн. наук, доцент, Ю. Л. Винников, д-р техн. наук, професор,
О. В. Матяш, канд. техн. наук, доцент, М. О. Рибалко, канд. техн. наук, ст. викладач

ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СВЕРДЛОВИН В КАРБОНАТНИХ МАЛОПРОНИКНИХ ПЛАСТАХ

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Ключові слова: похилоскероване буріння, технологія Fishbone буріння, багатостовбурна і багатовибійна свердловина, компоновка низу бурильної колони (КНБК), експлуатаційний хвостовик, привибійна зона свердловини (ПЗС), малопроникні карбонатні колектори, кислотна ерозія, механічна ерозія, струминна ерозія, хімічна ерозія, гірські породи, продуктивність.

Вступ. Сучасні технології буріння свердловин дозволяють їх спорудження в різноманітних гірничо-геологічних умовах з різною траєкторією стовбурів, зокрема, з похилоскерованими та горизонтальними ділянками. При цьому все частіше виконують проекти із багатостовбурною конструкцією (multilateral), а інколи навіть додатково і з багатовибійною конструкцією (multi-lateral completion with multiple ends). Принципова різниця між багатостовбурною та багатовибійною свердловинами в тому, що для багатостовбурної свердловини характерна наявність основного і одного або декілька повноцінних бічних стовбурів (laterals), кожен із яких може працювати як окрема свердловина. Для багатовибійної свердловини характерно наявність основного материнського стовбуру, з якого в межах продуктивного горизонту споруджуються додаткові розгалуження, тобто утворюються кілька цільових точок дренування в межах одного пласта. Принципові схеми свердловин із багатостовбурними і багатовибійними конструкціями наведено на рис. 1.

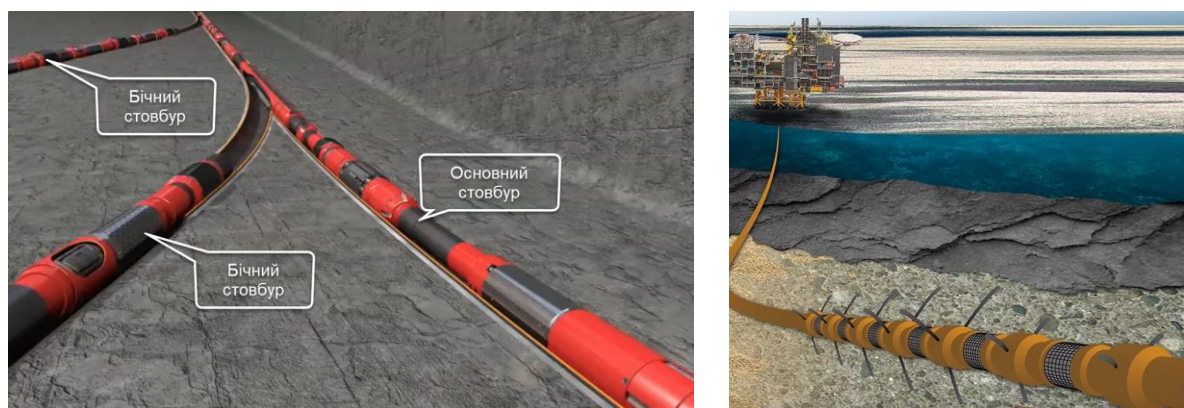


Рисунок 1 – Принципові схеми багатостовбурної (ліворуч) і багатовибійної (праворуч) конструкції свердловини

Звичайно, що спорудження багатостовбурних свердловин є складною технічною задачею і коштує дорого та може мати сенс лише для великодебітних свердловин, в т.ч. для морських свердловин, для експлуатації яких додатково потрібно використовувати

морські платформи. Для умов видобутку природного газу в гірничо-геологічних умовах України такі свердловини в більшості випадків є нерентабельними.

За умови розробки малопроникних колекторів і вилучення важковидобувних вуглеводнів, особливо на значних глибинах, що характерно для гірничо-геологічних умов Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), останнім часом гарно себе зарекомендувала технологія гідравлічного розриву пласта (ГРП). Альтернативою цього методу є спорудження багатовибійних свердловин, де бічні відгалудження від основного стовбуру будуть замінювати роль тріщин, які утворюються після ГРП. При цьому мінімізуються ризики неконтрольованого розриву пласта, оскільки буріння бічних відгалуджень від основного стовбуру є більш контрольованим процесом. Таким чином, технологія спорудження багатовибійних свердловин дає можливість суттєво підвищити відсоток вилучення вуглеводнів із продуктивного пласта (навіть важковидобувних) і розробляти родовища зі складною будовою.

На сьогодні вже апробовано конструкції багатовибійних свердловин типу Fishbone [1–7], принципова схема якої наведена на рис. 1. Така технологія застосовується для підвищення продуктивності свердловин за рахунок збільшення площі контакту між привибійною зоною та продуктивним пластом. Практика спорудження свердловин типу Fishbone накопичила відповідний досвід для різних гірничо-геологічних умов. Наприклад, є дані апробації цієї технології на глибинах 5200 м. Довжина відгалуджень коливається в межах від 10 до 300 м залежно від геолого-технічних умов і технологічних задач розробки відповідного продуктивного пласта. Ці відгалудження можуть бути влаштовані різної кількості в різних напрямках від основного стовбуру свердловини.

Наприклад, у [1] було запропоновано інтегрований аналітичний підхід до моделювання тиску, режимів фільтрації та рівню (індексу) продуктивності для горизонтальних Fishbone свердловин, у яких розташовані відгалудження від основного стовбуру передбачається під різними кутами з різними довжинами з урахуванням траєкторій проникності й анізотропії пласта. Зокрема, формуються нові моделі для очікуваних режимів течії, щоб обрати «сприятливу конфігурацію та розподіл» відгалуджень у довільних анізотропних середовищах. Запропонований підхід дає методику підбору конфігурації відгалуджень для збільшення продуктивності свердловини, що є надзвичайно корисним на етапі передпроектного техніко-економічного обґрунтування та скринінгу варіантів (особливо за обмежень на кількість і довжину відгалуджень). Також обґрунтовано доцільність таких конструкцій свердловин для низько- та середньопроникних пластів, де звичайний горизонтальний стовбур не забезпечує достатню продуктивність свердловин. При цьому слід зазначити, що реальні складно-тріщинуваті карбонати потребують верифікації на геомеханічних моделях у спеціалізованих програмних продуктах, наприклад ECLIPSE.

Також відомий досвід реалізації свердловини із Fishbone технологією, яка дала в 3,6 рази вищий початковий дебіт порівняно зі стандартною свердловиною. Оптимальні параметри гілок були: довжина 280 м, кут 15° – 25° , кількість гілок 3 (при умові заданої геометрії). При збільшенні довжини гілок до 400 м чи кількості більше 3 ефект зростає малими темпами або знижується через інтерференцію. Впровадження технології Fishbone дозволило значно збільшити площу контакту свердловин із пластом в умовах тонкого продуктивного горизонту, що є її ключовою перевагою [6].

Авторами [10] представлено технологію, яка вперше дозволила одночасно споруджувати 72 бічні канали (laterals) («гілки») з одного стовбура методом струминного прорізання (jetting) із системою контролю шламу у пласті м'якої крейди.

Для спорудження відгалужень у щільних піщаниках [5] добре себе зарекомендувала технологія Fishbone Drilling Dreamliner. При спусканні експлуатаційного фільтр-хвостовика в попередньо пробурений інтервал продуктивної частини свердловини, який не передбачається цементувати, його додатково дооснащують трубками (міні-бурильними колонами), які через спеціальні отвори у хвостовику будуть бурити відгалудження. Для цього застосовують невеликі турбіни для обертання бурових доліт, які розміщені на кінцях титанових голок Dreamliner (рис. 2) для скерованого проникнення в колектор. Такі титанові голки втискаються у пласт, а бурове долото (міні бурильна колона) при обертанні руйнує гірську породу. Принцип дії невеликих турбін аналогічний системі гвинтових вибійних двигунів – привід відбувається гідравлічним шляхом за рахунок циркуляції через міні бурильну колону бурового розчину. Шлам за рахунок циркуляції бурового розчину транспортується на поверхню як і при тридаційному бурінні свердловини. Діаметри влаштованих таким чином відгалуджень коливаються в діапазоні 10–20 мм.

Для створення відгалужень у карбонатних колекторах [4, 8–10] апробовано технологію струминної ерозії різними кислоти Fishbone Jetting (рис. 3). Для цього у кінці кожної голки є струменеве сопло, яке забезпечує циркуляцію кислоти, котра при взаємодії з карбонатами їх розчиняє і додатково руйнує своїм потоком (зазвичай тиск подачі більше 20 МПа) за рахунок механічної та хімічної ерозії гірської породи.

Фото бурильного інструменту за даними [10] наведено на рис. 4. За рахунок такої технології відпадає необхідність у циркуляції рідини аж до верху свердловини для транспортування шламу. На фото рис. 5 зображено зразки гірської породи із карбонатних кернів до та після випробувань кислотною ін'єкцією за даними [10], а на рис. 6 – фото обладнання для влаштування відгалуджень (гілок) після його використання в промислових умовах за даними [10].

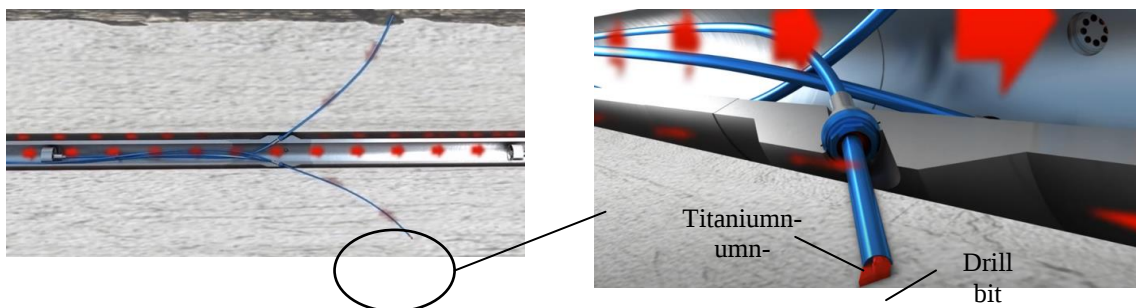


Рисунок 2 – Технологія Fishbone Drilling Dreamliner (Fishbones AS)



Рисунок 3 – Технологія Fishbone Jetting (Fishbones AS)

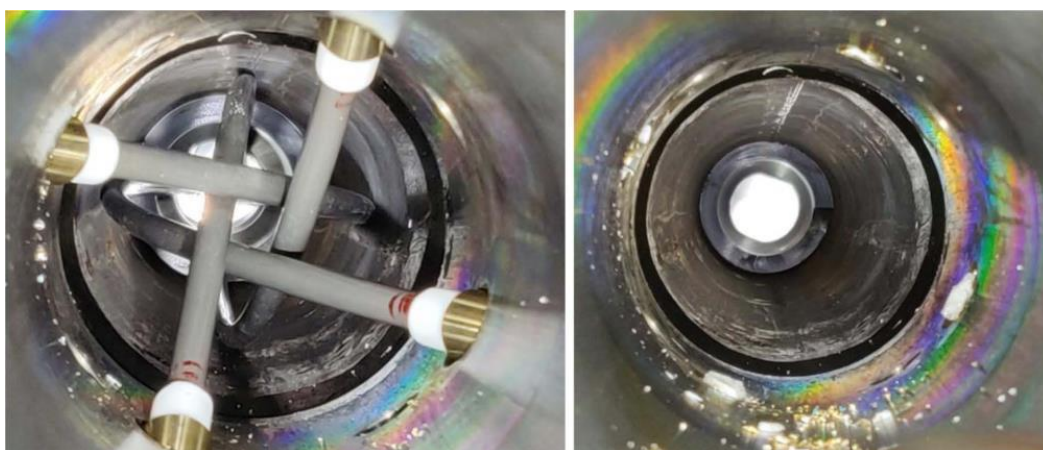


Рисунок 4 – Фото бурильного інструменту для Fishbone Jetting Technology: зліва – до початку влаштування відгалужень; праворуч – після завершення всіх бурових технологічних операцій [10]

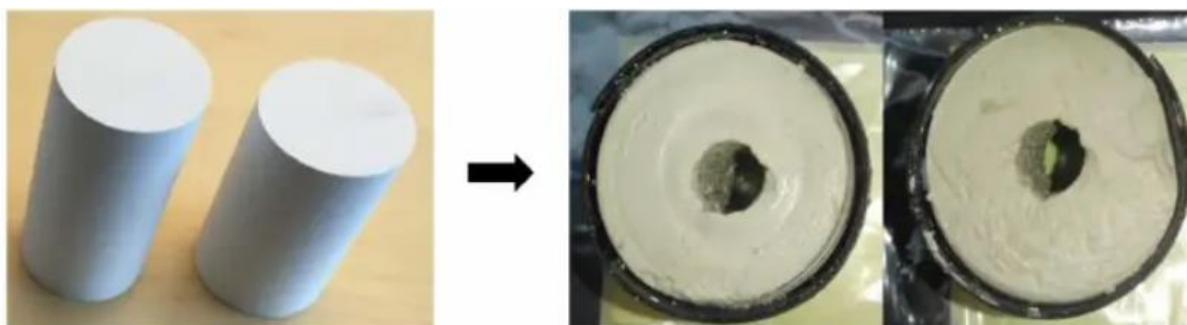


Рисунок 5 – Фото зразків гірської породи (карбонатні керни) до та після випробувань кислотною ін'єкцією за даними [10]



Рисунок 6 – Фото обладнання для влаштування відгалуджень (гілок) після його використання в промислових умовах за даними [10]

У [7] автори проаналізували вплив різних параметрів на те, як точно і ефективно інструмент входить із гілки назад у основний стовбур: кут відгалуження гілки, довжина гілки до “re-entry” точки (повторне входження бурового інструменту в головний стовбур під час буріння гілок свердловин типу “fishbone”), радіус кривизни, бурова швидкість, геометрія проходу від гілки до стовбура. Встановлено, що кут відгалуження гілки є критичним фактором: занадто великий кут (наприклад більше $\sim 30^\circ$) суттєво ускладнює re-entry в основний стовбур через більшу кривизну і більший радіус входу.

Обґрунтування проблеми. Свердловин типу Fishbone мають певну популярність, але в Україні цю технологію ще не застосовували, а отже актуальним є задача її впровадження з врахуванням умов місцевих родовищ. Потужні нафтогазонасичені карбонатні відклади ДДЗ, що зосереджені переважно у візейських і турнейських відкладах нижнього карбону та у верхньодевонських відкладах, мають значне площинне поширення та потужності до декількох сотень метрів [12]. Тому дані поклади мають великі перспективи щодо їх освоєння. Отже, необхідне обґрунтування ефективних конструкцій свердловин для максимального вилучення вуглеводнів із подібних відкладів.

Аналіз світового досвіду розробки нетрадиційних ресурсів вуглеводнів показує, що карбонатні, карбонатно-глинисті й інші колектори з високою карбонатністю успішно освоюються за допомогою системи горизонтальних свердловин і гідророзривів пласта [13].

При цьому є чимало складностей до розробки пластів з суттєвою карбонатністю та високими пластовими температурами, зі значним ступенем фаціальної неоднорідності і великою кількістю тектонічних порушень, із високими ризиками прориву заводненої зони до свердловини через неконтрольоване тріщиноутворення при ГРП тощо. Цих проблем можна уникнути при використанні свердловин типу Fishbone [6], що дозволяє контролювано створити потрібну кількість і довжину відгалужень у заданому напрямку від материнського стовбура свердловини. При цьому застосовують механічну та хімічну ерозію кислотами для розбурювання карбонатних колекторів замість бурових доліт при створенні відгалужень, що суттєво знижує ймовірність виникнення ускладнень і аварій, викликаних порушенням роботи й прихопленням бурового інструменту, а відповідно зменшує вартість робіт та ризики ускладнень і аварій.

Додатково слід відзначити, що спорудження відгалужень без промивання буровими технологічними рідинами має певну технологічну перевагу. Це викликано тим, що сучасні бурові розчини являють собою цілі комплекси з великою кількістю складних хімічних сполук. Висока хімічна активність карбонатних гірських порід часто призводить до значних змін властивостей порід унаслідок буріння, освоєння, перфорації свердловин при реакції з хімічними реагентами технологічних рідин. Особливу небезпеку несе буріння свердловин за умови значної депресії на пласт, оскільки в такому разі фільтрат бурового розчину проникає у продуктивний горизонт на значну глибину. Фільтрат здатний утворювати у пласті складні сполуки та частково чи повністю блокувати рух флюїдів у привибійній зоні свердловини. Щоб ліквідувати негативний вплив фільтрату бурових технологічних рідин слід проводити очистку привибійної зони свердловини, що ускладнює та збільшує вартість спорудження свердловини.

Одним з найбільших недоліків технології влаштування свердловин типу Fishbone є її відносно висока вартість, а тому як альтернативу застосовують технологію ГРП. Цей спосіб не завжди є технологічно доцільним і безпечним, наприклад, через близьке розміщення водоносного горизонту чи якихось технічних обмежень. Тому з метою підвищення технологічної ефективності освоєння високотемпературних колек-

торів з високою карбонатністю на глибинах до 5000 м та зменшення технічних і екологічних ризиків доцільно розробити рішення, які дозволять мінізувати вартість спорудження багатовибірних свердловин, зокрема відгалужень від материнського стовбуру й підвищать ефективність їх взаємодії з продуктивним пластом.

Мета досліджень – проаналізувати сучасні технологічні рішення задля підвищення продуктивності свердловин в карбонатних малопроникних пластах шляхом застосування технології буріння свердловин типу Fishbone.

Основна ідея роботи. Для зменшення вартості створення свердловин типу Fishbone доцільно удосконалити технологію струминної (механічної) та кислотної (хімічної) ерозії карбонатних колекторів шляхом підбору ефективного складу кислотних розчинів. Для підвищення ефективності взаємодії кожного відгалуження від материнського стовбуру з продуктивним пластом пропонується забезпечити глибоке проникнення в привибірні зони відгалужень розробленого авторами кислотного розчину. Після формування бічного відгалуження за допомогою того самого комплексу обладнання, що використовують для струминної ерозії, подається кислотний розчин низької в'язкості на основі повільнодіючих кислот. Тиски й об'єми закачування повинні відповідати гірничо-геологічним умовам та необхідній глибині формування привибірної зони з покращеними фільтраційно-ємнісними властивостями навколо відгалуження Fishbone (залежить від кількості відгалужень, насичуючого флюїду, міцнісних характеристик і т. ін.). Процес закачування залежно від властивостей продуктивного пласта і може тривати від кількох десятків хвилин до кількох (іноді до 30-40) годин. Після чого розчин витримують у пласті на розрахунковий час для реагування (залежно від карбонатності та структури породи, фільтраційних властивостей та ін.) та проводять освоєння свердловини для очищення від продуктів реакції.

При цьому проникність привибірної зони кожного відгалуження суттєво збільшиться (існуючі тріщини розширяться й утворяться додаткові вторинні глибокопроникні канали), і відповідно загальна продуктивність багатовибірної свердловини типу Fishbone також значно збільшиться. Принципова схема цього процесу подана на Fig. 7. Екологічна безпечність цієї технології досягається використанням кислотних розчинів на основі органічних кислот.

Гірські породи з високою карбонатністю розчиняються великою кількістю типів і видів кислот [14–16], але вибір ефективної технології для механічної і хімічної ерозії та наступної обробки привибірної зони відгалуження для підвищення проникності гірської породи в цих зонах залежить від цілого ряду факторів. З практики інтенсифікації видобування відомо, що однією з головних проблем для гірських порід на значних глибинах є недостатньо глибоке проникнення кислотних розчинів внаслідок малої проникності породи [17–19]. І тоді закачані у свердловину кислотні системи реагують із породою, не досягнувши достатньої для покращення фільтраційних властивостей глибини, в привибірній зоні.

Високі пластові температури [20] суттєво пришвидшують реакцію закачаних кислотних систем з гірською породою, і відповідно відсутнє необхідне глибоке проникнення у пласт. Тому не відбувається утворення розгалуженої сітки каналів. Таким чином, для досягнення очікуваного ефекту щодо збільшення проникності привибірної зони потрібно, щоб кислотні системи мали певну хімічну стійкість протягом часу проникнення в гірську породу, а потім при максимальному проникненні всупали в реакцію та розчиняли карбонатні колектори.

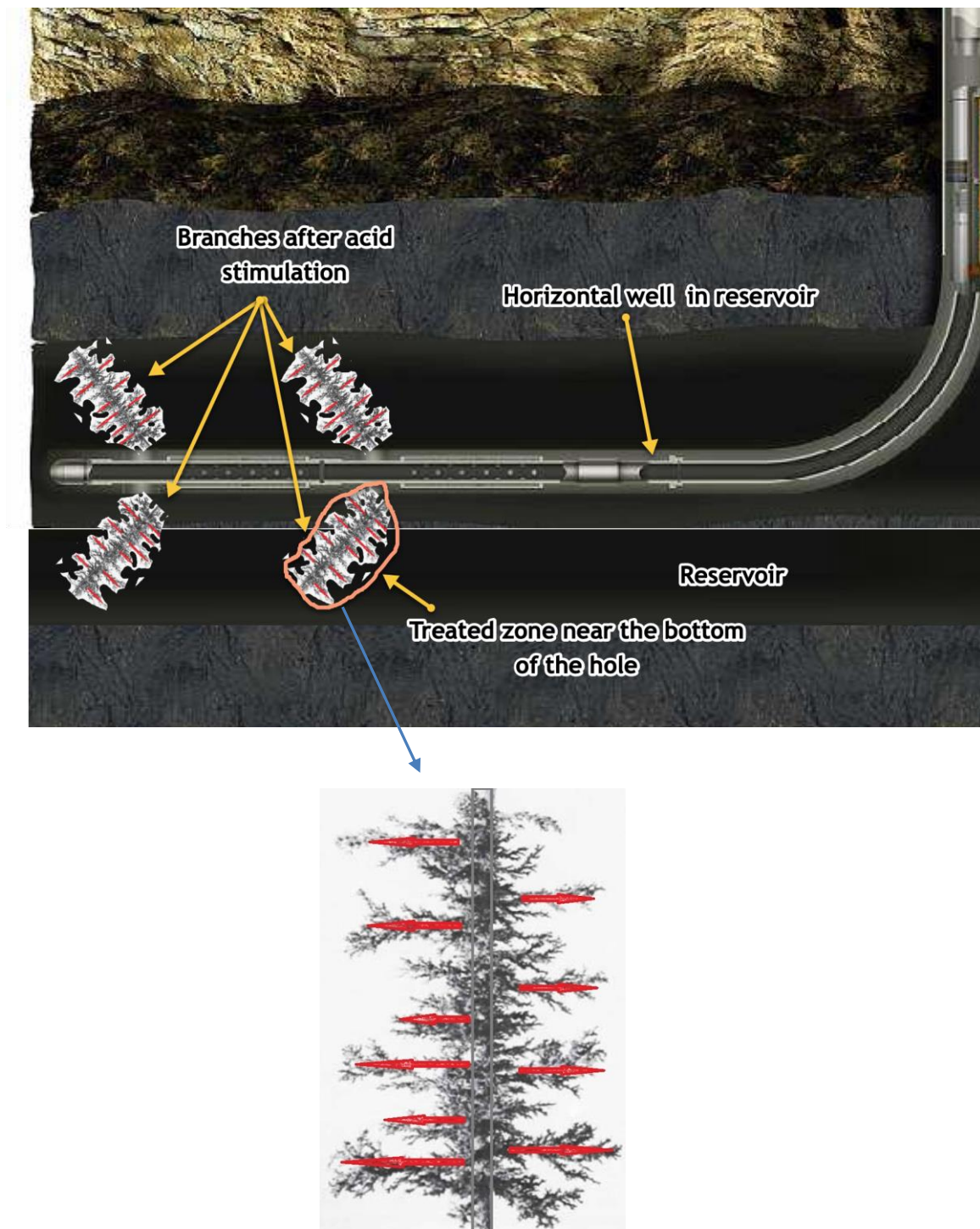


Рисунок 7 – Фрагмент свердловини типу Fishbone і відгалуження від її материнського стовбуру після обробки привибійної зони пласта високопроникаючими кислотними розчинами

Тому для забезпечення якісного процесу хімічної (кислотної) ерозії для спорудження відгалуження від материнського стовбуру свердловини типу Fishbone потрібно використовувати кислотні розчини із максимальною швидкістю реакції, а для послідовного проникнення кислотних систем у привибійну зону в межах утвореного відгалуження за умов високотемпературних карбонатних колекторів кислотні розчини при

пластових умовах повинні володіти наступними властивостями: незначна в'язкість і коефіцієнт поверхневого натягу; низька швидкість реакції; хімічні властивості мають забезпечувати відсутність нерозчинних осадів у процесі реакцій з флюїдами та породою, тощо.

Основні матеріали досліджень. За результатами патентного пошуку та аналізу відповідних публікацій за цією тематикою встановлено, що спорудження свердловин в основному відбувається за такою технологією: після проходження основного стовбура свердловини в експлуатаційну обсадну колону спускають клиновий відхиляючий інструмент whipstock і через його вікно здійснюють буріння відгалуження (sidetracking). Однак такий підхід неминуче зменшує діаметр основного стовбура, а оскільки основний стовбур є горизонтальною свердловиною, установка клинового інструмента є технічно складною, що знижує ефективність буріння та збільшує тривалість робіт із завершення свердловини.

На рис. 8 наведено технологію спорудження fishbone свердловини за патентом CN101397888B, що подано компанією CNPC Great Wall Drilling Co. Суть технології наступна: після закінчення буріння основного стовбура спускають експлуатаційний хвостовик (borehole hanger) та виконують завершення лайнером (liner completion). Далі по черзі спускають відхиляючі клини (window whipstock) та інструменти для створення бічних отворів у обсадній колоні (windowing), через які здійснюють проходку кожного бокового стовбура. Після буріння кожного відгалуження встановлюють підвіску та обсадну колону для завершення. Наприкінці система герметизується за допомогою внутрішнього пакера (поз. 7 на рис. 8) з підвішеним хвостовиком, який закріплений на експлуатаційній обсадній колоні (поз. 8 на рис. 8). При цьому після завершення бокового стовбура F1 (поз. 2 на рис. 8) у материнський стовбур (поз. 1 на рис. 8) спускають та монтують той самий тип підвіски і хвостовик (поз. 3 на рис. 8). Хвостовик свердловини є фільтраційним або перфорованим, що забезпечує гідравлічний зв'язок з основним стовбуром. Бокові стовбури F2, F3 (поз. 5 і 6 на рис. 8) тощо буряться та завершуються за тією ж послідовністю.

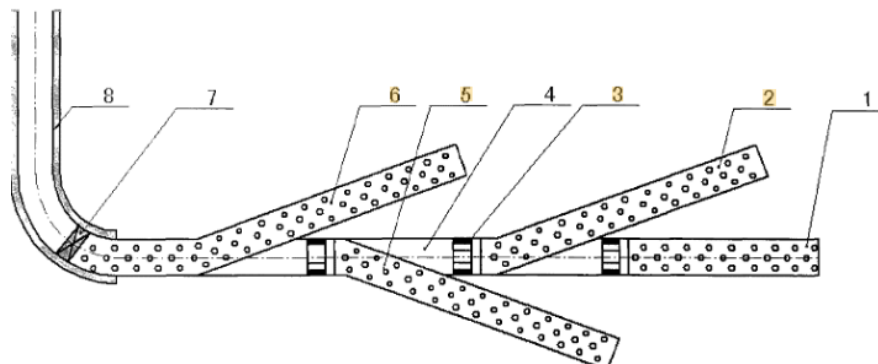


Рисунок 8 – Технологія спорудження свердловини типу Fishbone за патентом CN101397888B:

1 – основний материнський стовбур свердловини; 2, 5, 6 – відгалуження (гілка) F1, F2, F3 відповідно; 3 – механічний елемент кріплення, який служить для підвішування або закріплення обсадної колони, лайнера, або іншого обладнання всередині стовбура свердловини (borehole) на заданій глибині; 4 – whipstock-відхилювач у «вікні» свердловини; 7 – пакер;

8 – експлуатаційна обсадна колона свердловини

Механічне влаштування гілок через «вікно» (whipstock) – класичний варіант

fishbone зі спорудженням кожної гілки буровою колоною або КНБК на колоні гнучких труб. Такий підхід дає максимально контрольовану траєкторію, можливість ставити лайнери чи екрани відразу після буріння.

У разі використання кислотної ерозії у відповідних гірничо-геологічних умовах кислота не лише прорізає канал, а й розчиняє навколишній карбонат, формуючи радіальні «wormholes» на глибину до 0,5...1 м від осі каналу. У тестових свердловинах після acid-jetting спостерігали підвищення дебіту в 2...3 рази при мінімальному скінефекті. Для забезпечення точного кута виходу гілок використовується система мультипортового адаптера з попереднім орієнтуванням по азимуту. Позиціонування підтверджується інклінометричними даними та аналізом тискових піків під час jetting.

Середній ефективний час на створення однієї гілки 10...15 хв., при збільшенні цього часу ефективністю суттєво падає.

На рис. 9 наведено варіанти КНБК, для буріння струменем під високим тиском за даними публікації [11]. Зокрема, на рис. 10 наведено КНБК для перфорації обсадної труби (на рисунку ліворуч) і радіального струменевого буріння (на рисунку праворуч). В усіх цих варіантах спуск КНБК для влаштування бічних відгалуджень передбачено за допомогою колтюбінгового обладнання на гнучких насосно-компресорних трубах.

В таблиці 1 зведено узагальнені дані щодо етапів спорудження бічних відгалуджень (гілок) при використанні буріння за технологією Fishbone Jetting.

В таблиці 2 зведено основні проблеми і шляхи їх вирішення при використанні буріння за технологією Fishbone Jetting.

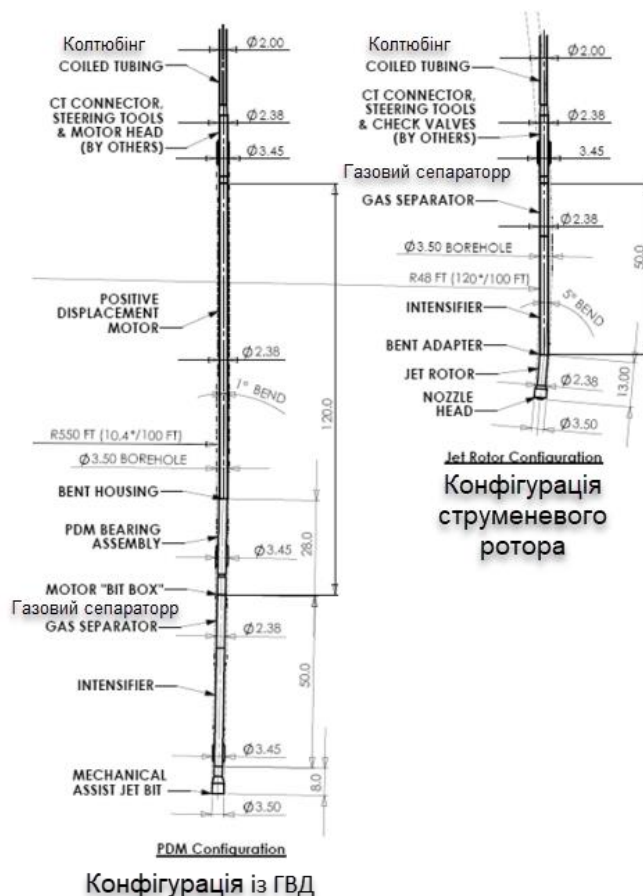


Рисунок 9 – Варіанти КНБК для буріння струменем під високим тиском [11]

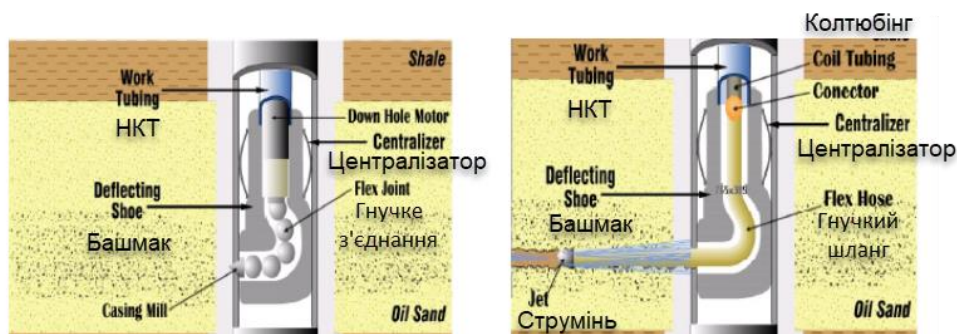


Рисунок 10 – КНБК для перфорації обсадної труби (ліворуч) і радіального струменевого буріння (праворуч) [11]

Таблиця 1 – Узагальнені дані щодо етапів спорудження бічних відгалуджень (гілок) при використанні буріння за технологією Fishbone Jetting

Етап	Опис дій	Примітки
1. Підготовка	Перфорація обсадної колони в інтервалі пласта, перевірка циркуляції.	Визначають напрямки гілок (звичайно 4...8 за один спуск).
2. Спуск Fishbone Sub	Спускається інструмент із набором голок (jetting needles).	Голки попередньо орієнтовані на задані кути.
3. Jetting	Подавання соляної кислоти HCl або абразиву для прорізання каналів у гірській породі.	Тиск подачі 15...25 МПа, час 5...15 хв на гілку.
4. Промивка / стабілізація	Промивання каналу; у деяких випадках додаткова кислотизація для розчинення дрібних уламків.	У карбонатах соляна кислота HCl створює «wormhole» навколо радіального каналу.
5. Перехід до наступного рівня	Інструмент переміщується вище або нижче в інший інтервал, повторення операції.	На одну свердловину доцільно передбачати 24...72 гілки (залежно від товщини пласта).

Таблиця 2 – Основні проблеми і шляхи їх вирішення при спорудженні бічних відгалуджень (гілок) при використанні буріння за технологією Fishbone Jetting

Проблема	Рішення
Винос шламу й розчинених частинок гірської породи при виконанні операцій jetting	Доцільно встановлення спеціального обладнання для контролю виносу із фільтрацією до 20 мкм.
Зминання або обвалення гілок у разі наявності слабких карбонатних порід	Доцільно використовувати обладнання контролю тиску та виконувати роботи із короткою тривалістю jetting, в т.ч. використовувати спеціальні склади кислот для стабілізації стійкості гірських порід.
Неточність орієнтації отворів у обсадній колоні (експлуатаційному хвостовику)	Доцільно використовувати направляючі портові муфти з маркуванням азимуту.
Контроль герметичності після завершення робіт	Доцільно використовувати пакери та обладнання контролю тиску для кожного інтервалу після обробкою гірських порід кислотою.

Для більш ефективного спорудження гілок, тобто для збільшення проникності ПЗП навколо них для глибоких свердловин в умовах високотемпературних пластах із високою карбонатністю слід після завершення операцій fishbone-jetting закачувати у ці тріщини кислотну систему на основі метилацетату. Кислоти з таким складом через невисоку в'язкість і низький поверхневий натяг краще проникають у низькопроникні карбонатні колектори та за рахунок сповільненої реакції мають достатньо активної кислоти для розчинення породи на значній відстані (декільтка метрів) від стовбуру бічного відгалудження основної свердловини. Це дозволить додатково збільшити продуктивність свердловини [14, 20, 21]. Зокрема, за результатами лабораторних досліджень на реальних кернах в пластових умовах проникність зразків після обробки збільшилась у межах 6,13...18,39 мД. Тобто середнє зростання проникності склало 3,19 рази. Це підтверджує, що механізм сповільненої кінетики та генерації кислоти в пластових умовах (за рахунок гідролізу метилацетату) створить стійкі дренажні канали та суттєво покращить фільтраційні характеристики на значній відстані від ПЗП.

На рис. 11 наведено схему механізму дії кислотної системи на основі метилацетату в карбонатному колекторі.



Рисунок 11 – Схема механізму дії кислотної системи на основі метилацетату в карбонатному колекторі

При спорудженні свердловин в гірничо-геологічних умовах ДДЗ слід розглянути гідравлічні особливості jetting-технології на великих глибинах (більше 3500 м). При гідростатичних тисках в свердловині більше 35 МПа зростає фонові протидія струменю. Це призводить до втрати ефективної різниці тиску. Для досягнення потрібної швидкості струменя (120...180 м/с) необхідно підняти робочий тиск насосів до 55...65 МПа. Через значну довжину НКТ відбуваються суттєві втрати тиску (до 5...8 МПа). Це вимагає використання високоміцних труб з внутрішнім діаметром більше 32 мм, зменшення вигинів, мінімізацію секційних з'єднань. Для створення необхідного тиску на вибої слід застосовувати спеціальні технології, що будуть створювати додатковий тиск на таких глибинах (Boost-підживлення або двоступеневе буріння).

Крім того слід враховувати геомеханічні та геотермальні фактори. Висока температура (120...160 °C): знижує в'язкість кислоти, що буде наслідком прискорення реакції з карбонатом (коротший час дії); змінює реології бурової рідини і як наслідок збільшує його турбулентність; потребують додаткової корозійної стійкості титанові гілки та ущільнення. Підвищений гірський тиск призводить схильність пласта до пла-

стичного деформування або руйнування відгалуджень при jetting; доцільно вводити стабілізуючу кислоту з осадом CaF_2 або SiO_2 для формування тонкої кірки.

В таблиці 3 зведено параметри для проектування буріння за технологією fishbone-jetting для різних глибин свердловини, а також прогнозні дані щодо можливих ризиків та очікуваного приросту продуктивності свердловини.

Таблиця 3 – Параметри для проектування буріння за технологією fishbone-jetting для різних глибин свердловини для гірських порід із високою карбонатністю

Параметр	Глибина свердловини		
	~2000 м	~3500 м	~5000 м
Втрати тиску у НКТ, МПа	2...4	5...8	8...12
Рекомендована довжина однієї гілки, м	8...15	6...8	4...6
Кількість гілок на інтервал пласта	30...60	20...40	16...30
Крок між гілками, м	3...5	4...6	5...7
Тип рідини для jetting	HCl 15...28 % + інгібітор	Ретардовані (наприклад, Emulsified/VDA від компанії SLB) HCl	Ретардовані високо-температурні (наприклад, E-acid/VDA від компанії SLB)
Додатки до рідини	ПАР, корозійні інгібітори	ПАР, органічні розчинники, корозійні інгібітори	ПАР, нанодобавки для сповільнення реакції
Орієнтація гілок і пріоритет напрямку їх буріння	15...30°; в сторону максимальної проникності k_{max}	15...25°; в сторону максимальної проникності k_{max}	10...20°; для мінімізації напружень у обсадній колоні
Контроль орієнтації	MWD/магнітний інклінометр	Гіроскопічні системи	Гіроскоп + оптоволокло (за потреби)
Моніторинг притоку	+/-	+/-	+
Контроль за вимиванням	Фільтрація $\geq 20..30$ мкм	Посилена фільтрація 10...20 мкм	5...10 мкм, високо-продуктивні шламоуловлювачі
Ризики	Втрата циркуляції, корозія	Руйнування каналів, перегрів обладнання, корозія	Розрив обсадної колони, корозія, заклинювання
Очікуваний приріст продуктивності свердловини	$\sim \times 2...3$	$\sim \times 1.5...2$	$\sim \times 1.3...1.8$

Як наслідок на глибинах більше 3500 м раціональна довжина радіальних каналів має бути 6...8 м, бо при більшій їх довжині втрати енергії струменя стає дуже критич-

ною. Також є сенс зменшити кількість гілок (максимум 20...40 каналів) зі збільшенням інтервалом між ними (4...6 м), щоб мінімізувати взаємне ослаблення цементного кільця кріплення експлуатаційного хвостовика. Це переводить fishbone-технологію з відносно недорогого методу інтенсифікації («low-cost stimulation») у високотехнологічну інженерну операцію, близьку до міні-гідророзриву.

Висновки. Технологія буріння бічних відгалужень від материнського стовбура свердловини типу Fishbone шляхом струминної (механічної) та хімічної (кислотної) ерозії є ефективним методом, який мінімізує ризики виникнення аварійних ситуацій з бурильним інструментом, дає можливість уникнути забруднення привибійної зони фільтратом бурових промивальних рідин, зменшує вартість і підвищує екологічність процесу. Для ефективного спорудження бічних відгалужень шляхом струминної (механічної) та хімічної (кислотної) ерозії найкраще підходять кислоти на основі соляної кислоти, оскільки у них найвища швидкість реакції, що підтверджено дослідним шляхом на кернях гірської породи з глибин 4892...4896 м.

Теоретично доведено, що продуктивність свердловин влаштованих по технології fishbone-jetting у порівнянні із звичайними свердловинами з горизонтальною ділянкою в межах продуктивного горизонту, складеного гірськими породами із високою карбонатністю, залежно від гірничо-геологічних умов збільшиться від 1,3 до 3 разів. При цьому для підвищення ефективності після завершення операцій fishbone-jetting доцільно на додатково обробити бічні відгалуження (гілки) розчинами на основі ацетатів оцтової кислоти.

Позитивний ефект від буріння за Fishbone технологією для глибоких свердловин сильно залежить від пластових умов, геометрії і фізики пласта та часто потребує комбінування з кислотним ГРП або «розумними» завершеннями (smart well або artificial intelligence) свердловин.

Для слабких крейдових карбонатів для значних глибин, що характерно для гірничо-геологічних умов ДДЗ можливі зсувне і порове руйнування влаштованих мікростовбурів бічних відгалужень (гілок). Тому є сенс при використанні технології fishbone-jetting застосовувати спеціальні склади кислот для стабілізації стійкості гірських порід, а також при механічній ерозії зменшувати час дії активної кислоти.

Для мінімізації піскоутворення та ерозії доцільно установлювати піскозахисні екрани (або сучасні технології розумного закінчення свердловини, що можуть автоматично регулювати тиски і швидкості припливу у свердловину продукції) для керування дебітом і рівномірного навантаження гілок.

Наразі відкритим залишається питання інтерференції гілок, оскільки збільшення продуктивності свердловини є нелінійним процесом: надто довгі і щільні гілки збільшують взаємний перетік і зменшують провідність. Тому слід досягати оптимізації довжини, кута й інтервалу між гілками залежно від анізотропії проникності, а також інших гірничо-геологічних умов. Тому через невизначеність геологічних умов і високу анізотропію колекторів із високою карбонатністю слід спершу влаштовувати пілотний стовбур свердловини із коротшими гілками з відповідним циклом досліджень, далі вже проводити масштабування конфігурації свердловини із напрошуванням додаткових гілок.

- ISSN 2078-5364 (print). Інтегровані технології та енергозбереження 4'2025 79
ISSN 2708-0625 (online)

<https://doi.org/10.2118/191625-MS>.

14. Zimin O. Improvement of Acid Solutions for Stimulation of Compacted High-Temperature Carbonate Collectors. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. Vol. 6(3(62)). P. 11–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.246604>.

15. Dong K., Zhu D., Hill A. D. The role of temperature on optimal conditions in dolomite acidizing: An experimental study and its applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. Vol. 165. P. 736–742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.018>.

16. Xie S., Jiao Y., Lan Y., Wu Y., Cao C. Research on Productivity Management of Gas Wells in Low Permeability Carbonate Reservoir. *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2020*. Singapore : Springer. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0761-5_40.

17. Zhou M., Xu X., Zhang Y. Experimental study on production performance and reserves utilization law in carbonate gas reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2022. Vol. 12. P. 1183–1192. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01377-x>.

18. Zhang H., Cheng J., Zhang X. An Evaluation of the Applicability of the Steady-State Productivity Approach for Horizontal Wells in Low-Permeability Heterogeneous Gas Reservoirs. *Processes*. 2025. Vol. 13. P. 173. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13010173>.

19. Chen X., Huang Q., Liu P. Review of key technologies for ultra-deep carbonate reservoir development: Acid fracturing and challenges. 2025.

20. Зімін О. Л., Зезекало І. Г. Методика та особливості досліджень фільтраційних властивостей ущільнених глибокозалегаючих гірських порід. *Вісник ХТУ «ХПІ»*. 2024. № 1(11). С. 17–24. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79893> (дата звернення: 27.08.2025).

21. Zezekalo I., Zimin O., Laziebna Y. Increasing the efficiency of stimulation of compacted carbonate reservoirs with acid solutions based on methyl acetate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3(6). P. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305373>.

Bibliography (transliterated)

1. Al-Rbeawi S., Artun E. Fishbone type horizontal wellbore completion: A study for pressure behavior, flow regimes, and productivity index. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 176. P. 172–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.12.076>.

2. Hassan A., Elkatatny S., Abdulraheem A. Application of Artificial Intelligence Techniques to Predict the Well Productivity of Fishbone Wells. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, No. 21. P. 6083. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11216083>.

3. Freyer R., Kristiansen T. G., Madland M. V., Omdal E. Multilateral system allowing 100 level 5 laterals drilled simultaneously: dream or reality. *8th European Formation Damage Conference*, Scheveningen, The Netherlands. 2009. Paper SPE-121814-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/121814-MS>.

4. Rice K., Jorgensen T., Waters J. First Installation of Efficient and Accurate Multilaterals Stimulation Technology in Carbonate Oil Application. *SPE Eastern Regional Meeting*, Charleston, WV, USA. 2014. Paper SPE-171021-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/171021-MS>.

5. Torvund S., Stene K., Jensaas H. First Installation of Multilateral Drilling Stimulation Technology in Tight Sandstone Formation. *SPE Western Regional Meeting*, Anchorage, Alaska. 2016. Paper SPE-180390-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/180390-MS>.
6. Xing G., Guo F., Song C. Fishbone Well Drilling and Completion Technology in Ultra-Thin Reservoir. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*, Tianjin, China. 2012. DOI: <https://doi.org/10.2118/155958-MS>.
7. Yu F., Huang G., Ni H. Analysis of the main factors affecting bottom hole assembly Re-entry into main hole in forward drilling of fishbone wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 189. P. 107018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107018>.
8. Elkatatny S., Mahmoud M., Tariq Z., Abdulraheem A. New insights into the prediction of heterogeneous carbonate reservoir permeability from well logs using artificial intelligence network. *Neural Computing*. 2018. Vol. 30(9). P. 2673–2683. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-017-2850-x>.
9. Rachapudi R. V., Al-Jaberi S. S., Al Hashemi M., Punnapala S. Fishbone Stimulation a Game Changer for Tight Carbonate Productivity Enhancement. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition Conference*. 2020. Paper SPE-202636-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/202636-MS>.
10. Bjørnseth F., Kristiansen T. G., Flatebø R. World First Simultaneous Jetting of 72 Laterals with Solids Control. Technology Development and Field Trial. *SPE Norway One Day Seminar*, Bergen. 2019. Paper SPE-195620-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/195620-MS>.
11. Kolle J. Jet turbodrill for enhanced geothermal system development. Tempress. 2009. Technical Report TR-153.
12. Zimin O. L., Zezekalo I. H., Bondar H. M., Yevdoshchuk M. I. Perspektyvy rozrobky ushchilnenykh karbonatnykh kolektoriv u mezhakh Dniprovsko-Donetskoi zapadyny. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2019. № 2. P. 14–18.
13. Burton R. C., Nozaki M., Zwarich N. R., Furui K. Improved Understanding of Acid Wormholing in Carbonate Reservoirs through Laboratory Experiments and Field Measurements. *SPE Journal*. 2020. Vol. 25, No. 2. P. 587–608. DOI: <https://doi.org/10.2118/191625-MS>.
14. Zimin O. Improvement of Acid Solutions for Stimulation of Compacted High-Temperature Carbonate Collectors. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. Vol. 6(3(62)). P. 11–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.246604>.
15. Dong K., Zhu D., Hill A. D. The role of temperature on optimal conditions in dolomite acidizing: An experimental study and its applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. Vol. 165. P. 736–742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.018>.
16. Xie S., Jiao Y., Lan Y., Wu Y., Cao C. Research on Productivity Management of Gas Wells in Low Permeability Carbonate Reservoir. *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2020*. Singapore : Springer. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0761-5_40.
17. Zhou M., Xu X., Zhang Y. Experimental study on production performance and reserves utilization law in carbonate gas reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2022. Vol. 12. P. 1183–1192. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01377-x>.

18. Zhang H., Cheng J., Zhang X. An Evaluation of the Applicability of the Steady-State Productivity Approach for Horizontal Wells in Low-Permeability Heterogeneous Gas Reservoirs. *Processes*. 2025. Vol. 13. P. 173. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13010173>.

19. Chen X., Huang Q., Liu P. Review of key technologies for ultra-deep carbonate reservoir development: Acid fracturing and challenges. 2025.

20. Zimin O. L., Zezekalo I. H. Metodyka ta osoblyvosti doslidzhen filtratsiinykh vlastyvostei ushchilnennykh hlybokozaliahaiuchykh hirskykh porid. *Visnyk NTU «KhPI»*. 2024. № 1(11). P. 17–24. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79893> (data zvernennia: 27.08.2025).

21. Zezekalo I., Zimin O., Laziebna Y. Increasing the efficiency of stimulation of compacted carbonate reservoirs with acid solutions based on methyl acetate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3(6). P. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305373>.

УДК 622.245

М. О. Харченко, канд. техн. наук, доцент, Ю. Л. Винников, д-р техн. наук, професор,
О. В. Матяш, канд. техн. наук, доцент, М. О. Рибалко, канд. техн. наук, ст. викладач

ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СВЕРДЛОВИН В КАРБОНАТНИХ МАЛОПРОНИКНИХ ПЛАСТАХ

У статті представлено результати аналізу сучасних технологічних рішень для підвищення продуктивності свердловин у карбонатних колекторах із низькою проникністю, в т.ч. для високотемпературних. Розглянуто ефективність застосування багатовибірних свердловин типу *Fishbone* як альтернативи гідророзриву пласта для вилучення важковидобувних вуглеводнів у складних гірничо-геологічних умовах, характерних для Дніпровсько-Донецької западини. Проаналізовано світовий досвід буріння багатовибірних свердловин за технологією *Fishbone*. Наведено принципові схеми та параметри відгалужень, особливості їх геометрії та впливу на фільтраційні властивості привибірної зони пласта. Узагальнено результати лабораторних і промислових досліджень щодо технологій *Fishbone Drilling Dreamliner* та *Fishbone Jetting*, у яких спорудження відгалужень здійснюється механічним руйнуванням для колекторів із гірськими породами піщаники та механічною і кислотною ерозією для колекторів із гірськими породами з високою карбонатністю. Розглянуто технологічні рішення компоновання бурильної колони для буріння за технологією *Fishbone-jetting*. Особливу увагу приділено підбору кислотних систем для високотемпературних колекторів, де рекомендовано використовувати низьков'язкі розчини на основі метилацетату, що забезпечують глибоке проникнення у пласт і формування розгалуженої системи мікроканалів. Подано узагальнені параметри проектування буріння для глибин 2000...5000 м, ураховано вплив пластових температур, тисків та втрат енергії струменя. Встановлено, що при оптимізації довжини гілок (6...15 м) і їх орієнтації (10...25°) приріст продуктивності свердловин може становити від 1,3 до 3 разів порівняно зі звичайними горизонтальними свердловинами. Запропоновано рекомендації щодо комбінованого використання технології *Fishbone-jetting* із кислотними обробками та системами «розумного» завершення свердловин для

підвищення їх дебіту, надійності та екологічної безпечності експлуатації.

Ключові слова: похилоскероване буріння, технологія Fishbone буріння, багатостовбурна і багатовибійна свердловина, компоновка низу бурильної колони (КНБК), експлуатаційний хвостовик, привибійна зона свердловини (ПЗС), малопроникні карбонатні колектори, кислотна ерозія, механічна ерозія, струминна ерозія, хімічна ерозія, гірські породи, продуктивність.

М. О. Kharchenko, Yu. L. Vynnykov, O. V. Matyash, M. O. Rybalko

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR ENHANCING WELL PRODUCTIVITY IN LOW-PERMEABILITY CARBONATE RESERVOIRS

The article presents the results of an analysis of modern technological solutions aimed at improving the productivity of wells in carbonate reservoirs with low permeability, including high-temperature formations. The effectiveness of using *Fishbone*-type multi-branched wells as an alternative to hydraulic fracturing for the extraction of hard-to-recover hydrocarbons under complex geological conditions typical of the Dnieper-Donets depression is considered. The global experience of drilling multilateral wells using *Fishbone* technology is analyzed. Basic schemes and parameters of branch laterals, as well as the peculiarities of their geometry and influence on the filtration properties of the near-wellbore zone, are presented. The results of laboratory and field studies on *Fishbone Drilling Dreamliner* and *Fishbone Jetting* technologies are summarized, where branch channels are created by mechanical destruction in sandstone reservoirs and by mechanical-acid erosion in carbonate formations. Technological solutions for the bottom-hole assembly configuration used in *Fishbone-jetting* drilling are reviewed. Particular attention is paid to the selection of acid systems for high-temperature reservoirs, where low-viscosity solutions based on methyl acetate are recommended to ensure deep penetration into the formation and the creation of a branched microchannel system. Generalized design parameters for drilling at depths of 2000...5000 m are provided, taking into account formation temperature, pressure, and jet energy losses. It has been established that with optimal branch length (6...15 m) and orientation (10...25°), the well productivity can increase by 1.3...3 times compared with conventional horizontal wells. Recommendations are proposed for the combined application of *Fishbone-jetting* technology with acid treatments and intelligent completion systems to enhance production rates, reliability, and environmental safety of well operation.

Keywords: directional drilling, Fishbone drilling technology, multilateral and multi-branched well, bottom hole assembly (BHA), borehole hanger, near-wellbore zone (NWZ), low-permeability carbonate reservoirs, acid mechanical jetting and chemical erosion, rock formations, production enhancement.

С. А. Лещенко, канд. техн. наук, доцент, О. Ю. Бровін, канд. техн. наук,
С. Г. Дерібо, канд. техн. наук, доцент, І. Д. Мадика, магістр,
О. С. Водоріз, канд. фіз.-мат. наук, доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗНОСОСТІЙКОГО ХРОМУВАННЯ ВИСОКОКРЕМНИСТОГО СПЛАВУ АЛЮМІНІЮ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: технологія електрохімічних покриттів, гальванотехніка, висококремністий алюмінієвий сплав, зносостійке хромування, електроліт хромування, анодні матеріали, енергоефективність, фізика процесу, відновлення іонів хрому, швидкість осадження, вихід за струмом.

Вступ. Актуальність проблеми розроблення та вдосконалення технології хромування ливарних алюмінієвих сплавів останніми роками зростає у зв'язку зі збільшенням попиту на процеси отримання твердих зносостійких покриттів. Зносостійке хромування алюмінієвих сплавів є одним із ключових етапів технології виготовлення деталей двигунів внутрішнього згоряння, транспортних засобів та літальних апаратів, елементів гідравлічних і пневматичних систем, прецизійних деталей та приладів, штампів і пресформ тощо. До експлуатаційних характеристик зносостійких хромових покриттів висувають підвищені вимоги [1, 2, 3], що зумовлює необхідність постійного вдосконалення технології їхнього нанесення. Забезпечення довговічності хромових покриттів та виробів загалом неможливе без системного контролю якості на всіх стадіях технологічного процесу від попередньої підготовки поверхні до заключної термообробки, якщо така застосовується [4].

Щільні хромові покриття значної товщини відзначаються високою твердістю та зносостійкістю, тоді як мікротріщинуваті покриття здатні зменшувати коефіцієнт тертя завдяки утриманню мастильних матеріалів у мікротріщинах [5]. Тверді зносостійкі хромові покриття отримують виключно електрохімічним методом [6, 7], проте електролітичне осадження хрому має низку обмежень, пов'язаних зі складністю забезпечення рівномірної товщини шару на деталях складної геометрії через невисоку розсіювальну та покривну здатність електроліту [6, 7].

Однією з найважливіших умов під час осадження хрому на алюмінієві сплави є забезпечення високої адгезії покриття до основи [7]. Для цього особливу увагу слід приділити підготовці поверхні перед хромуванням. Відомо [8], що висококремністий сплав АК12М2МгН містить від 11 % до 13 % кремнію і від 1,5 % до 3 % міді, які істотно впливають на поведінку матеріалу в хімічних середовищах, проте у відкритій літературі відсутні дані щодо оптимальних методів підготовки поверхні саме цього сплаву до хромування.

Високі показники твердості, зносостійкості та стійкості до корозії поєднуються з можливістю формування покриттів товщиною понад 50 мкм, а в окремих випадках – до кількох сотень мікрометрів [5, 9]. Проте збільшення товщини покриття потребує підвищення тривалості процесу осадження, тому забезпечення високої продуктивності та енергоефективності процесу хромування є надзвичайно важливим.

Мета дослідження полягала у розробленні технологічного процесу, що забезпечує високопродуктивний та енергоефективний процес твердого зносостійкого хромування із високою адгезією до поверхні сплаву АК12М2МгН.

Завдання дослідження полягало у виборі технології підготовки поверхні сплаву АК12М2МгН, що забезпечить якісне зчеплення хромових покриттів з основою, і визначенні складу електроліту та режиму хромування, що забезпечить зносостійке хромування з високою продуктивністю та енергоефективністю.

Методика експерименту. Обробці піддавалися зразки, виготовлені з ливарного алюмінієвого сплаву АК12М2МгН з площею поверхні близько 2 дм².

Перед нанесенням хромового покриття проводили комплекс механічної та хімічної підготовки поверхні [2, 3]. Механічна обробка, спрямована на зменшення шорсткості та забезпечення необхідної чистоти поверхні, включала піскоструминну обробку з метою підвищення адгезії хромового покриття до основи, шліфування для формування рівномірної гладкої поверхні і хонінгування з метою створення мікрорельєфу, здатного утримувати мастило.

Метою хімічної підготовки було очищення поверхні від жирових забруднень, оксидних плівок і продуктів корозії. Дослідженнями встановлено, що чисту поверхню без ознак травлення алюмінієвої основи можна отримати при температурі 45–55 °С упродовж 10 хв. у розчині знежирення наступного складу, г/дм³: Na₂SiO₃ – 10–15, Na₅P₃O₁₀ – 6–10, КОН – 3–5, NaC₆H₁₁O₇ – 2–3, синтанол ДС-10 – 3–5.

Після промивання у теплій і холодній проточній воді здійснювалось дослідження різних розчинів хімічного травлення поверхні. Використання суміші концентрованих азотної та фторидної кислот при об'ємному співвідношенні HNO₃ : HF = 3 : 1 призводило до надмірного розтравлення поверхні сплаву. Розчин, який містив 150–200 г/дм³ H₃PO₄ і 35–45 г/дм³ NaF, виявився навпаки недостатньо активним і не забезпечував належного очищення поверхні. Рівномірного травлення з характерним освітленням поверхні вдалось досягти у розчині складу, г/дм³: HNO₃ – 400, HF – 100 при 15–30 °С упродовж 0,5–1 хв.

Спеціальна хімічна підготовка повинна створити умови для надійного зчеплення металевого покриття з підкладкою зі сплаву АК12М2МгН. Необхідність у спеціальній хімічній підготовці зумовлена наявністю на поверхні стійкої оксидної плівки, різко негативним електродним потенціалом алюмінію, його амфотерним характером, схильністю до утримання водню в мікропорах, а також значною різницею коефіцієнтів термічного розширення алюмінієвої основи та хромового покриття [6, 7, 10].

Цинкатна обробка проводилася при температурі 18–25 °С упродовж 6–15 с. у розчині складу, г/дм³: ZnO – 90–100, NaOH – 350–600, Na₂S – 0,5–5,0. Процес здійснювали дворазово з проміжним видаленням контактної осадової шару цинку шляхом травлення у розчині HNO₃ 450–470 г/дм³ при 18–25 °С впродовж 5–10 с.

Анодне оксидування здійснювали в розчині H₃PO₄ (ρ = 1,685 кг/дм³) 25–30 об.% при 18–25 °С, анодній густині струму 1,5 А/дм², напрузі 20–30 В протягом 10 хв.

Осадження хромових покриттів здійснювалось з таких електролітів, г/дм³:

- № 1 – розбавлений стандартний електроліт: CrO₃ – 150; H₂SO₄ – 1,5.
- № 2 – стандартний електроліт: CrO₃ – 250; H₂SO₄ – 2,5.
- № 3 – надсульфатний електроліт: CrO₃ – 250–300; H₂SO₄ – 8–10.
- № 4 – інноваційний каталізований електроліт: CrO₃ – 225–325; H₂SO₄ – 2,25–3,9; добавка Solar Catalyst 2100 – 3,5–4,5.

– № 5 – електроліт HEEF-25: CrO_3 – 235–265; H_2SO_4 – 3,2–4,5, Cr(III) < 8, добавка HEEF-25 MS – 260.

З метою забезпечення необхідного рівня експлуатаційної зносостійкості, товщина хромового покриття становила не менше 50 мкм [9]. Як нерозчинні аноди в електролітах хромування можуть застосовуватись аноди з чистого свинцю, свинцево-олов'яні (з вмістом олова 7–10 %), свинцево-сурм'яні (вміст сурми 6–10 %). Для промислового твердого та зносостійкого хромування в усіх зазначених електролітах були застосовані та добре себе проявили свинцево-олов'яні аноди, які виявили хімічну і механічну стійкість і забезпечили рівномірний розподіл струму завдяки утворенню стабільної електропровідної плівки PbO_2 .

Визначення катодного виходу за струмом (BC_k) здійснювали гравіметричним методом. Швидкість осадження розраховували за приростом товщини шару на одиницю часу.

Розробка технологічного процесу. В технології спеціальної обробки алюмінієвих сплавів можуть бути застосовані такі методи [6, 7, 11]: цинкатна обробка, анодне оксидування в ортофосфорній кислоті, хромування по тонкому підшару нікелю і безпосереднє хромування.

Цинкатна обробка. Результати досліджень показали, що після цинкатної обробки спостерігалось посереднє зчеплення хромового покриття з основою. Необхідність виконання короткотривалих операцій (до 15 с) призводило до великого відсотку браку та унеможлиблювало автоматизацію процесу. Значна кількість проміжних операцій, підвищені витрати води на промивання та великий обсяг стічних вод роблять таку технологічну схему малоефективною для промислового застосування.

Анодне оксидування в ортофосфорній кислоті реалізує інший підхід до спеціальної підготовки алюмінієвих сплавів, що полягає у формуванні анодно-оксидного шару. Відомо [6, 7, 11], що в результаті такої обробки утворюються анодно-оксидні покриття з порами конусоподібної форми діаметром близько 0,3 мкм, в яких повинно осаджуватись гальванічне покриття, що сприятиме збільшенню площі поверхні зчеплення покриття з основою. Експериментальні дослідження показали недостатню міцність адгезії хромового покриття при такому способі підготовки, що могло бути спричинено поганою покривною здатністю електроліту хромування. Крім того, в'язкий розчин ортофосфорної кислоти важко видаляється з пор утвореного анодно-оксидного шару, що призводить до появи дефектів і збільшення відсотка браку.

Попереднє нанесення тонкого підшару нікелю вважається одним із перспективних методів забезпечення надійного зчеплення хромових покриттів з алюмінієвими сплавами, він створює проміжний шар, який зменшує різницю потенціалів між пасивним хромовим покриттям та активною алюмінієвою поверхнею.

Рекомендована технологічна послідовність операцій включає такі етапи [7]:

1. Осадження тонкого шару нікелю з електроліту складу, г/дм^3 : $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 140–150, MgSO_4 – 70–80, NH_4Cl – 15, H_3BO_3 – 20. Режим осадження: $\text{pH} = 5,5\text{--}5,8$, температура 18–25 °C, катодна густина струму 2 А/дм^2 , тривалість 5 хв.
2. Уловлювання електроліту та промивання у проточній воді.
3. Термічна обробка при 100–120 °C протягом 20–30 хв.
4. Активація у 10 %-му розчині HCl тривалістю 3–5 с.
5. Проточне промивання.
6. Анодна обробка у 20 % розчині H_2SO_4 при $j_a = 10 \text{ А/дм}^2$ впродовж 15 с.
7. Промивання та прогрівання у гарячій воді.

8. Хромування.

Попри ефективність, зазначений спосіб є складним, тривалим і енергоємним, що обмежує можливість його застосування, особливо в умовах серійного виробництва.

Безпосереднє хромування алюмінієвих сплавів є найкоротшим варіантом технологічного процесу, рекомендований порядок операцій такий [6]:

1. Травлення у суміші концентрованих кислот $\text{HNO}_3 : \text{HF} = 1 : 5$ (за об'ємом).
2. Промивання проточною водою.
3. Прогрівання деталей у гарячій воді.
4. Хромування.

Недоліком даного методу є агресивність травильного розчину через значну концентрацію HF. Водночас суттєвою його перевагою є спрощена технологічна схема, істотно менша тривалість підготовки, менша ймовірність виникнення дефектів зчеплення. Проведені дослідження підтвердили ефективність такого методу для хромування сплаву АК12М2МгН, і саме цей метод рекомендований нами для подальшого використання.

Вибір та обґрунтування складу електроліту та режиму хромування. У промисловій практиці України найпоширенішими є стандартні, фторвмісні, надсульфатні та інші електроліти [12]. Останніми роками все ширше застосовують електроліти хромування з сучасними нефторидними каталізаторами [3, 9, 13, 14], зокрема Solar Catalyst 2100, Lunachrom, HV Catalyser, Hene-6000 Catalyst тощо.

Стандартний (сульфатний) електроліт є базовим для більшості типів хромових покриттів. Його основними компонентами є CrO_3 у концентрації 150–350 г/дм³ та H_2SO_4 у певному співвідношенні з вмістом хромової кислоти (найчастіше $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4 = 100 : 1$ [9]), яка виконує роль каталізатора відновлення Cr(VI) до металевого хрому. Співвідношення 80 : 1 сприяє утворенню більш гладких осадів, однак супроводжується зниженням розсіювальної та покривної здатності електроліту. У надсульфатних ваннах, де співвідношення $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4 \approx 30 : 1$, можливе швидке осадження товстих блискучих покриттів при температурі до 75 °C і густині струму до 100–300 А/дм², проте з низькою розсіювальною здатністю, що обмежує їх використання деталями простої геометрії. При співвідношенні $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4$ до $\approx 130 : 1$ розсіювальна здатність зростає, але швидкість відновлення хрому зменшується.

Фторидні (зокрема кремнефторидні) електроліти характеризуються низькою переваг порівняно із сульфатними. Вони дають змогу проводити процес при кімнатній температурі, мають кращу розсіювальну здатність, катодний вихід за струмом понад 20 % [9]. Типовий вміст хромової кислоти становить 175–400 г/дм³, а фторидного каталізатору у вигляді кремнефториду $\text{SiF}_6^{2-} - 2-3$ г/дм³.

Однак фторидні ванни мають низку обмежень. Вони сприяють хімічному підтравлюванню ділянок основи з низькою катодною густиною струму, що призводить до забруднення електроліту продуктами розчинення металу основи. Такі електроліти є агресивнішими, на свинцевих анодах утворюється плівка фторидів з високим електричним опором. Покриття з фторидних електролітів зазвичай мають нижчу твердість і більшу пластичність порівняно з осадами зі стандартних сульфатних ванн.

Останнім часом активно розвивається застосування нефторидних високошвидкісних електролітів, в яких використовуються запатентовані вторинні каталізатори. Такі системи забезпечують формування хромових покриттів із максимальною зносостійкістю та корозійною стійкістю [9]. Процес проводять при 55–60 °C з катодним виходом за струмом понад 20 %. Відсутність фторидів у складі таких електролітів зменшує їхню

агресивність і виключає необхідність футерування сталевих ванн. Проте в літературі немає інформації про застосування таких електролітів для хромування саме алюмінієвих сплавів.

Дослідження енергоефективності і продуктивності електролітів хромування. Продуктивність та енергоефективність процесу хромування визначаються катодною густиною струму і виходом за струмом реакції одержання металевих хрому.

Метою цього етапу дослідження було визначення максимальної катодної густини струму, при якій можливе осадження хромових покриттів з заданими властивостями, а також залежності виходу за струмом реакції відновлення хрому від катодної густини струму і температури.

В стандартному електроліті № 1 було зафіксовано найвище значення катодного виходу за струмом $BC_k = 18\%$ при температурі $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і катодній густині струму 90 А/дм^2 . При цьому швидкість осадження становила 90 мкм/год .

Згідно з даними наукових досліджень [7], надсульфатний електроліт № 3, який характеризується підвищеним вмістом сульфат-іонів і низькою розсіювальною здатністю, повинен забезпечувати катодний вихід за струмом $22\text{--}24\%$ при температурі $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і катодній густині струму $180\text{--}200\text{ А/дм}^2$. Проте експериментальні результати, отримані на досліджуваному сплаві, виявились дещо іншими (рис. 1). На основі цих даних побудовано залежність швидкості осадження хрому від катодної густини струму та температури (рис. 2). Установлено, що при температурі понад $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ та густині струму понад 200 А/дм^2 різко зменшується розсіювальна й покривна здатність електроліту № 3, що обмежує застосування таких режимів.

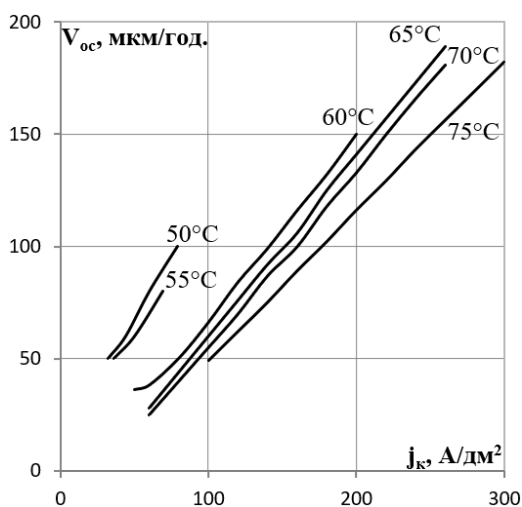


Рисунок 1 – Залежність катодного виходу за струмом у надсульфатному електроліті № 3 від катодної густини струму і температури

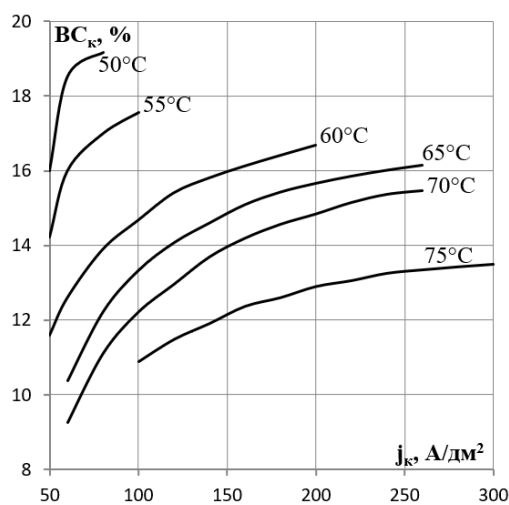


Рисунок 2 – Залежність швидкості осадження хрому з надсульфатного електроліту № 3 від катодної густини струму і температури

Попри це, при температурі $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і катодній густині струму 200 А/дм^2 швидкість осадження хрому з електроліту № 3 досягала 150 мкм/год при виході за струмом $16,7\%$. Таким чином, надсульфатний електроліт продемонстрував вищу продуктивність, ніж стандартний, однак поступається за стабільністю процесу та рівномірністю покриття, особливо на деталях складної конфігурації.

Електроліт № 4 характеризується покращеною розсіювальною здатністю і стабільністю при низьких густинах струму. Випробування показали кращу зносостійкість

покривтів, одержаних з електроліту № 4, що пояснюється формуванням мікропористої структури, яка сприяє утриманню мастильних матеріалів та зниженню коефіцієнта тертя. Питомі витрати добавки Solar Catalyst 2100 становлять близько $0,8 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})$ нанесеного покриття, що свідчить про економічність її використання у виробничих умовах.

Використання добавки Solar Catalyst 2100 у складі електроліту № 4 сприяло досягненню кращої продуктивності (рис. 3) та більшого катодного виходу за струмом (рис. 4) у порівнянні зі стандартним електролітом № 2.

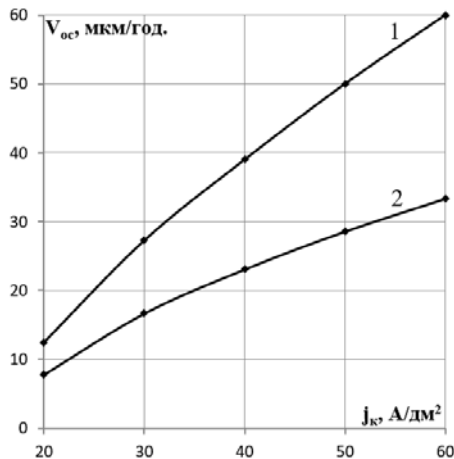


Рисунок 3 – Продуктивність процесу хромування: 1 – в електроліті № 4; 2 – в електроліті № 2

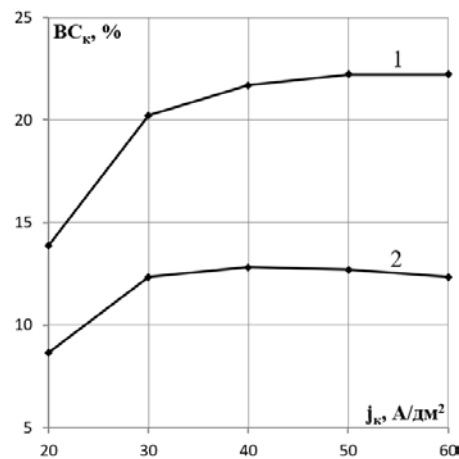


Рисунок 4 – Катодний вихід за струмом: 1 – в електроліті № 4; 2 – в електроліті № 2

Електроліт № 5 забезпечує осадження твердого зносостійкого хрому при температурі від 20 до 60 °С (оптимально – при 55–60 °С) і густині струму від 20 до 60 А/дм² [13]. Представлені на наступних рисунках залежності свідчать про перевагу електроліту № 5 перед стандартним електролітом № 2 як за енергоефективністю (виходом за струмом, див. рис. 5), так і за продуктивністю (швидкістю осаду, див. рис. 6).

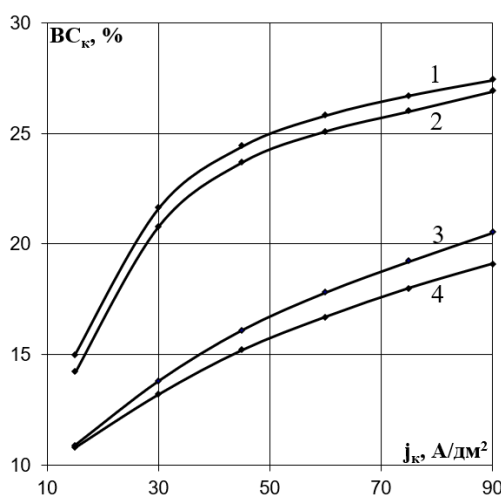


Рисунок 5 – Катодний вихід за струмом: 1, 2 – в електроліті № 5; 3, 4 – в електроліті № 2, 1, 3 – при 55 °С, 2, 4 – при 60 °С

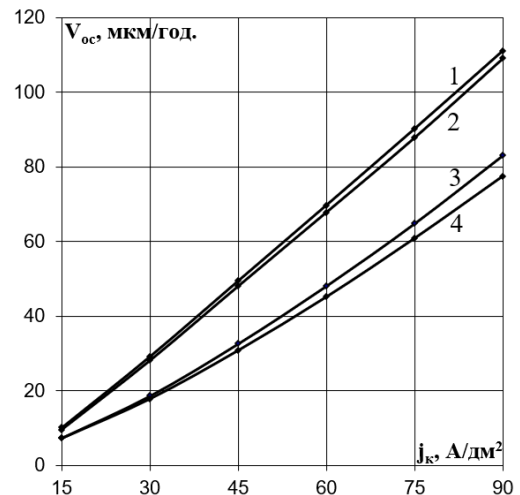


Рисунок 6 – Продуктивність хромування: 1, 2 – в електроліті № 5; 3, 4 – в електроліті № 2, 1, 3 – при 55 °С, 2, 4 – при 60 °С

Висновки

1. Встановлено, що безпосереднє хромування поверхні сплаву АК12М2МгН після хімічного знежирення і травлення у суміші $\text{HNO}_3 : \text{HF} = 1 : 5$ (об.) є обґрунтованою технологією, здатною забезпечити якісне зчеплення хромових покриттів з основою.

2. У розбавленому стандартному електроліті хромування № 1 при $T = 60^\circ\text{C}$ і $j_k = 90 \text{ А/дм}^2$ досягнуто продуктивності 90 мкм/год. при катодному виході за струмом $\text{BC}_k = 18\%$.

3. У надсульфатному електроліті № 3 найбільшій швидкості осадження хромового покриття із заданими властивостями досягнуто при $T = 60^\circ\text{C}$ і $j_k = 200 \text{ А/дм}^2$, вона складає 150 мкм/год. Але нестабільність електроліту та нерівномірність покриття по товщині обмежує його використання деталями простої конфігурації.

4. Використання каталізатора Solar Catalyst 2100 у складі електроліту № 4 дозволяє досягти катодного виходу за струмом близько 22 %, при густині струму 60 А/дм^2 досягнута швидкість хромування лише 60 мкм/год., але покриття має суттєво вищу зносостійкість, рівномірність по товщині, мікропористу структуру, яка сприяє утриманню мастильних матеріалів та зниженню коефіцієнта тертя.

5. В електроліті № 5 також одержано покриття з підвищеною твердістю, зносостійкістю, мікропористою структурою, при $T = 60^\circ\text{C}$, $j_k = 90 \text{ А/дм}^2$ катодний вихід за струмом досягає 27 %, а швидкість осадження 110 мкм/год.

Співставлення швидкості осадження з якісними характеристиками покриттів свідчить про переваги і доцільність використання електроліту № 5, тобто процесу HEEF-25.

Література

1. Hard Chrome Plating. URL: <https://hcsplating.com/finishes/hard-chrome-plating>.
2. Important Considerations In Hard Chromium Plating. *Plating & Surface Finishing*. April 2002. URL: <https://www.nmfrc.org/pdf/psf2002/040210.pdf>.
3. Eric Svenson. DuraChrome Hard Chromium Plating. *Plating Resources*, Inc. Cocoa, Florida, USA 1980, 2006. URL: <https://plating.com/wp-content/uploads/2022/03/DuraChrome.pdf>.
4. Посувайло В. М. Порівняння методів поверхневого зміцнення деталей машин покриттями. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 4. С. 83-97. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>.
5. Sohi M. H., Kashi A., Hadavi S. M. Comparative tribological study of hard and crack-free electrodeposited chromium coatings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. No. 138(1-3), P. 219-222. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092401360300075X>.
6. Якименко Г. Я. Гальванічні покриття. Аспекти вибору, функціональні властивості і технологія одержання : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2009. 148 с.
7. Якименко Г. Я., Артеменко В. М. Технічна електрохімія. Ч.3. Гальванічні виробництва: Підручник / за ред. Б. І. Байрачного. Харків : НТУ «ХПІ», 2006. 272 с.
8. ДСТУ 2839-94. Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. Київ : Держстандарт України. 1995. 44 с. Дійсний з 31.10.1994 р.
9. Kenneth R. Newby. Functional Chromium Plating. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092401360300075X>.

10. John Bibber. Zincate- or Stannate-Free Plating of Aluminum and its Alloys. *Metal Finishing*. 2013. Vol. 111, iss. 1. P. 23–25. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(13\)70173-9](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(13)70173-9).
11. Сучасні технології функціональної обробки поверхні. Лабораторний практикум : навч. посіб.; уклад.: О. В. Косогін, М. В. Бик, Д. Ю. Ущаповський. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2025. 71 с.
12. Слюсар М. А. Сучасні електроліти та методи хромування. *Технології та дизайн*. 2019. № 3(32). URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2019_3_12.
13. HEEF 25. Chromium plating process. URL: <https://www.scribd.com/document/926713806/Heef-25>.
14. HENE 6000 catalyst. A unique non fluoride catalyst for high speed chromium plating. URL: <https://www.primechemicals.com.pk/data-sheets/HENE-6000-catalyst-data-sheet.pdf>.

Bibliography (transliterated)

1. Hard Chrome Plating. URL: <https://hcsplating.com/finishes/hard-chrome-plating>.
2. Important Considerations In Hard Chromium Plating. *Plating & Surface Finishing*. April 2002. URL: <https://www.nmfr.org/pdf/psf2002/040210.pdf>.
3. Eric Svenson. DuraChrome Hard Chromium Plating. *Plating Resources*, Inc. Cocoa, Florida, USA 1980, 2006. URL: <https://plating.com/wp-content/uploads/2022/03/DuraChrome.pdf>.
4. Posuvailo V. M. Porivniannia metodiv poverkhnevoho zmitsnennia detalei mashyn pokryttiamy. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*. 2021. № 4. P. 83–97. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>.
5. Sohi M. H., Kashi A., Hadavi S. M. Comparative tribological study of hard and crack-free electrodeposited chromium coatings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. No. 138(1-3), P. 219–222. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092401360300075X>.
6. Yakymenko H. Ya. Halvanichni pokryttia. Aspekty vyboru, funktsionalni vlasty?vosti i tekhnolohiia oderzhannia : navch. posib. Kharkiv : NTU «KhPI». 2009. 148 p.
7. Yakymenko H. Ya., Artemenko V. M. Tekhnichna elektrokhemiiia. Ch.3. Halvanichni vyrobnytstva: Pidruchnyk / za red. B. I. Bairachnoho. Kharkiv : NTU «KhPI». 2006. 272 p.
8. DSTU 2839-94. Splavy aliuminiievi lyvarni. Tekhnichni umovy. Kyiv : Derzh?tandart Ukrainy. 1995. 44 p. Diisnyi z 31.10.1994 r.
9. Kenneth R. Newby. Functional Chromium Plating. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002605769593368C>.
10. John Bibber. Zincate- or Stannate-Free Plating of Aluminum and its Alloys. *Metal Finishing*. 2013. Vol. 111, iss. 1. P. 23–25. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(13\)70173-9](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(13)70173-9).
11. Suchasni tekhnolohii funktsionalnoi obrobky poverkhni. Laboratornyi praktykum : navch. posib.; uklad.: O. V. Kosohin, M. V. Byk, D. Yu. Ushchapovskyi. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho. 2025. 71 p.
12. Sliusar M. A. Suchasni elektrolity ta metody khromuvannia. *Tekhnolohii ta dyzain*. 2019. № 3(32). URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2019_3_12.
13. HEEF 25. Chromium plating process. URL: <https://www.scribd.com/document/926713806/Heef-25>.

14. HENE 6000 catalyst. A unique non fluoride catalyst for high speed chromium plating. URL: <https://www.primechemicals.com.pk/data-sheets/HENE-6000-catalyst-data-sheet.pdf>.

УДК 621.357

С. А. Лещенко, канд. техн. наук, доцент, О. Ю. Бровін, канд. техн. наук,
С. Г. Дерібо, канд. техн. наук, доцент, І. Д. Мадика, магістр,
О. С. Водоріз, канд. фіз.-мат. наук, доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗНОСОСТІЙКОГО ХРОМУВАННЯ ВИСОКОКРЕМНИСТОГО СПЛАВУ АЛЮМІНІЮ

У роботі представлено результати дослідження технологічних особливостей процесу твердого зносостійкого хромування деталей, виготовлених із висококремнистого алюмінієвого сплаву АК12М2МгН. Для формування мікрорельєфу і забезпечення надійного зчеплення покриття запропоновано застосування піскоструминної обробки, шліфування та хонінгування. Встановлено, що використання традиційних методів спеціальної підготовки (цинкатної обробки, анодування в ортофосфорній кислоті або нанесення підшару нікелю) для поставленої задачі є недоцільним через ускладнення технологічної схеми та погіршення адгезії. Запропоновано схему підготовки поверхні, що передбачає хімічне знежирення, травлення в суміші концентрованих кислот H^+/NO_3^- : $\text{HF} = 1 : 5$ та безпосереднє хромування.

Експериментально досліджено енергоефективність та продуктивність стандартних (розбавлених і середньоконцентрованих), надсульфатних, а також сучасних електролітів з добавками Solar Catalyst 2100 і HEEF-25.

У розбавленому стандартному електроліті при температурі 60 °С досягнуто швидкості осадження 90 мкм/год. при катодному виході за струмом 18 %. У надсульфатному електроліті, з огляду на його низьку розсіювальну здатність, рекомендовано обмежити температуру до 60 °С і катодну густину струму до 200 А/дм². За цих параметрів швидкість осадження становила 150 мкм/год., а катодний вихід за струмом склав 16,7 %.

Використання електроліту з добавкою Solar Catalyst 2100 забезпечило катодний вихід за струмом до 22 % та формування мікропористої структури покриття. Незважаючи на нижчу швидкість осадження (60 мкм/год.), покриття характеризуються підвищеною зносостійкістю та кращою розсіювальною здатністю.

В електроліті HEEF-25 одержано покриття з підвищеною твердістю, зносостійкістю та мікропористою структурою. За температури 60 °С і густини струму 90 А/дм² катодний вихід за струмом досягав 27 %, а швидкість хромування – 110 мкм/год.

Отримані результати свідчать про доцільність застосування електроліту HEEF-25 для зносостійкого хромування висококремнистого алюмінієвого сплаву АК12М2МгН.

Ключові слова: технологія електрохімічних покриттів, гальванотехніка, висококремністий алюмінієвий сплав, зносостійке хромування, електроліт хромування, анодні матеріали, енергоефективність, фізика процесу, відновлення іонів хрому, швидкість осадження, вихід за струмом.

S. A. Leshchenko, O. Yu. Brovin, S. H. Deribo, I. D. Madyka, O. S. Vodoriz

RESEARCH ON THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF WEAR-RESISTANT CHROMIUM PLATING OF HIGH-SILICON ALUMINUM ALLOYS

The paper presents the results of a study of the technological features of the process of hard wear-resistant chromium plating of parts made of high-silicon aluminum alloy. To form micro-relief and ensure reliable adhesion of the coating, it is proposed to use sandblasting, grinding, and honing. It has been established that the use of traditional methods of special preparation (zincate treatment, anodizing in orthophosphoric acid, or applying a nickel under-layer) for the task at hand is impractical due to the complexity of the technological scheme and poor adhesion. It is proposed that the surface preparation scheme should consist of chemical degreasing, etching in a mixture of concentrated acids $\text{HNO}_3 : \text{HF} = 1 : 5$, and direct chromium plating.

The energy efficiency and productivity of standard (diluted and medium-concentration), supersulfate, and modern electrolytes with Solar Catalyst 2100 and HEEF-25 additives were experimentally investigated.

In diluted standard electrolyte at a temperature of 60 °C, a deposition rate of 90 $\mu\text{m/h}$ was achieved with a cathode current efficiency of 18 %. In supersulfate electrolyte, given its low throwing power, it is recommended to limit the temperature to 60 °C and the cathode current density to 200 A/dm^2 . Under these parameters, the deposition rate was 150 $\mu\text{m/h}$, and the cathode current efficiency was 16.7 %.

The use of electrolyte with Solar Catalyst 2100 additive provided a cathode current efficiency of up to 22 % and the formation of a microporous coating structure. Despite the lower deposition rate (60 $\mu\text{m/h}$), the coatings are characterized by increased wear resistance and better throwing power.

The HEEF-25 electrolyte also produced a coating with increased hardness, wear resistance, and a microporous structure. At a temperature of 60 °C and a current density of 90 A/dm^2 , the cathode current efficiency reached 27 %, and the chromium plating rate was 110 $\mu\text{m/h}$.

The results obtained indicate the feasibility of using HEEF-25 electrolyte for wear-resistant chromium plating of high-silicon aluminum alloy.

Keywords: electrochemical coating technology, electroplating, high-silicon aluminum alloy, wear-resistant chrome plating, electrolytic chrome plating, anode materials, energy efficiency, process physics, chromium ion reduction, deposition rate, current output.

І. М. Волошина, канд. техн. наук, доцент, І. О. Грецький, канд. біол. наук, доцент,
О. Р. Мокроусова, д-р техн. наук, професор, Д. О. Хейломський, магістр

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДМИВКИ БАКТЕРІАЛЬНИХ КЛІТИН ТА ТІЛЕЦЬ ВКЛЮЧЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ РЕКОМБІНАНТНОГО ІНСУЛІНУ ЛЮДИНИ

Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, Україна

Ключові слова: рекомбінантний інсулін, біопроцеси, оптимізація, сепарація, культура бактеріальних клітин, тілець включення, відмивка.

Вступ. Біотехнологія зробила революцію в різних сферах промисловості двадцятого сторіччя [1]. Її вплив сьогодні прослідковується від створення продуктів харчування [2, 3] або розробки та доставки ліків [4, 5, 6] до створення споживчих товарів. Технології рекомбінантної ДНК знайшли активне застосування в медичній галузі шляхом розробки та отримання лікарських засобів на основі терапевтичних білків, які складно отримувати з природних джерел. Терапевтичні білки мають досить різноманітні медичні застосування [7–11]: наприклад, інсулін людини для лікування діабету, еритропоетин для лікування анемії та хронічної ниркової недостатності, інтерферони для лікування або уповільнення прогресування розсіяного склерозу, вакцини для лікування гепатиту В, інтерлейкін-2 для регуляції імунної відповіді шляхом стимуляції росту та диференціації Т-клітин і інших імунних клітин, проурокиназа використовується як тромболітик для розчинення коронарних тромбів, тканинний активатор плазміногену (фермент) для тромболітичної терапії, тобто для розчинення тромбів при інфаркті міокарда, інсульти, легеневої емболії, а також багато різних видів моноклональних антитіл для діагностики та можливого лікування раку молочної залози та легенів, і це лише деякі з них. Багатовекторність та інтенсивність розвитку біотехнологій на основі рекомбінантної ДНК потребує завжди оперативного та ефективного удосконалення важливих технологічних процесів та впровадження обладнання з необхідними функціями та параметрами роботи.

Постановка проблеми. Сучасні технології виробництва рекомбінантного інсуліну людини ґрунтуються на специфічних біопроцесах, для яких знайшли ефективне використання бактерії *Escherichia coli* (далі – *E. coli*) і *Bacillus subtilis* [12, 13]. Такі бактерії використовуються як клітини-господарі для техніки рекомбінантної ДНК. *E. coli* має міцну клітинну стінку з зовнішньою і внутрішньою мембраною. Зазвичай *E. coli* має видовжену форму з розмірами 3–5 мкм в довжину і 1 мкм в ширину. Терапевтичний білок може експресуватися цими клітинами-господарями або організмами за допомогою рекомбінантної ДНК. Білок, що отримується із зазначених бактерій, може залишатися в клітині (внутрішньоклітинний) або секретуватися назовні клітини (позаклітинний). Представлений біосинтез забезпечує ефективну інженерну гнучкість, специфічність, універсальність, надійність та економічну ефективність. На жаль, білок, що експресується в результаті біопроцесу, знаходиться в дуже малих кількостях, але знаходиться у великому об'ємі суспензії, тобто має низьку концентрацію. В даному випадку слід вказати на існуючі ключові перешкоди в методах рекомбінантної ДНК для

отримання терапевтичного білка [14], які відповідно формулюють головні задачі для вирішення. Перша, це відновлення концентрації (концентрування) білка після ферментації шляхом розділення, та друга – забезпечення високої чистоти білкового продукту за допомогою очищення. Зазначені задачі в представлений біофармацевтичній технології, в основному, можуть бути вирішені оптимізацією процесів сепарації та очищення бактеріальних клітин та тілець включень.

Тому *об'єктом дослідження* є процеси відмивки бактеріальних клітин штаму генно-модифікованого штаму-продуценту рекомбінантного інсуліну людини на основі *Escherichia coli BL21* від компонентів культурального середовища, а також відмивки, виділених в результаті руйнування зазначених бактеріальних клітин тілець включення (ТВ) від компонентів цитоплазми та клітинного дебрису.

Предметом дослідження є режимів роботи відцентрового сепаратора в процесі відмивки бактеріальних клітин штаму-продуценту рекомбінантного інсуліну людини на основі *E.coli BL21* від компонентів культурального середовища, відмивки ТВ, виділених в результаті руйнування зазначених бактеріальних клітин, від компонентів цитоплазми та клітинного дебрису.

Мета роботи – оптимізація параметрів відмивання тілець включень для підвищення якості відмивки, зменшення втрат цільового продукту та покращення технологічності проведення подальшої стадії даунстрім-процесу – розчинення тілець включень.

Основна частина. Оптимізація режимів роботи відцентрових сепараторів є ключовим завданням на багатьох стадіях біотехнологічних процесів виробництва, особливо у виробництві рекомбінантного інсуліну людини. Найважливішими факторами, що визначають ефективність сепарації, є швидкість подачі стартової суміші та часовий інтервал між автоматичними вивантаженнями барабану (для сепараторів з автоматичним вивантаженням). Правильно підібране співвідношення цих величин забезпечує досягнення прийнятного рівня очищення та запобігає надмірним втратам продукту. Як наслідок, подальший перебіг процесів розчинення відмитих ТВ і рефолдінгу стає більш технологічним і призводить до кращих виходів більш чистого рефолдованого гібридного білка.

Відповідно до напряму дослідження основними критеріями оптимізації процесу сепарації визначено рівень втрат та ступень очищення відмитих ТВ.

Визначення параметрів простору дизайну:

Процес виробництва кожної серії АФІ рекомбінантного інсуліну людини на ділянці ферментації охоплює кілька операцій відцентрової сепарації, зокрема:

- I Сепарація: відділення клітинної маси від культурального середовища;
- II Сепарація: відмивка клітинної маси водою очищеною;
- III Сепарація: відділення ТВ та незруйнованих клітин від клітинного дебрису та дезінтеграційного середовища після першої дезінтеграції;
- IV Сепарація: відділення ТВ від клітинного дебрису та дезінтеграційного середовища після другої дезінтеграції;
- V Сепарація: перша відмивка ТВ від клітинного дебрису водою очищеною;
- VI Сепарація: друга відмивка ТВ від клітинного дебрису водою очищеною.

Для визначення оптимальних параметрів сепарацій розроблено оптимізований план відбору проб на основі редукованого центрального плану дослідження поверхні відгуку для двофакторного експерименту [15].

Типові співвідношення вмісту гібридного білку та загального вмісту білку (мг/мл) у фугатах від швидкості подачі суспензії (л/г) показано на рис. 1.

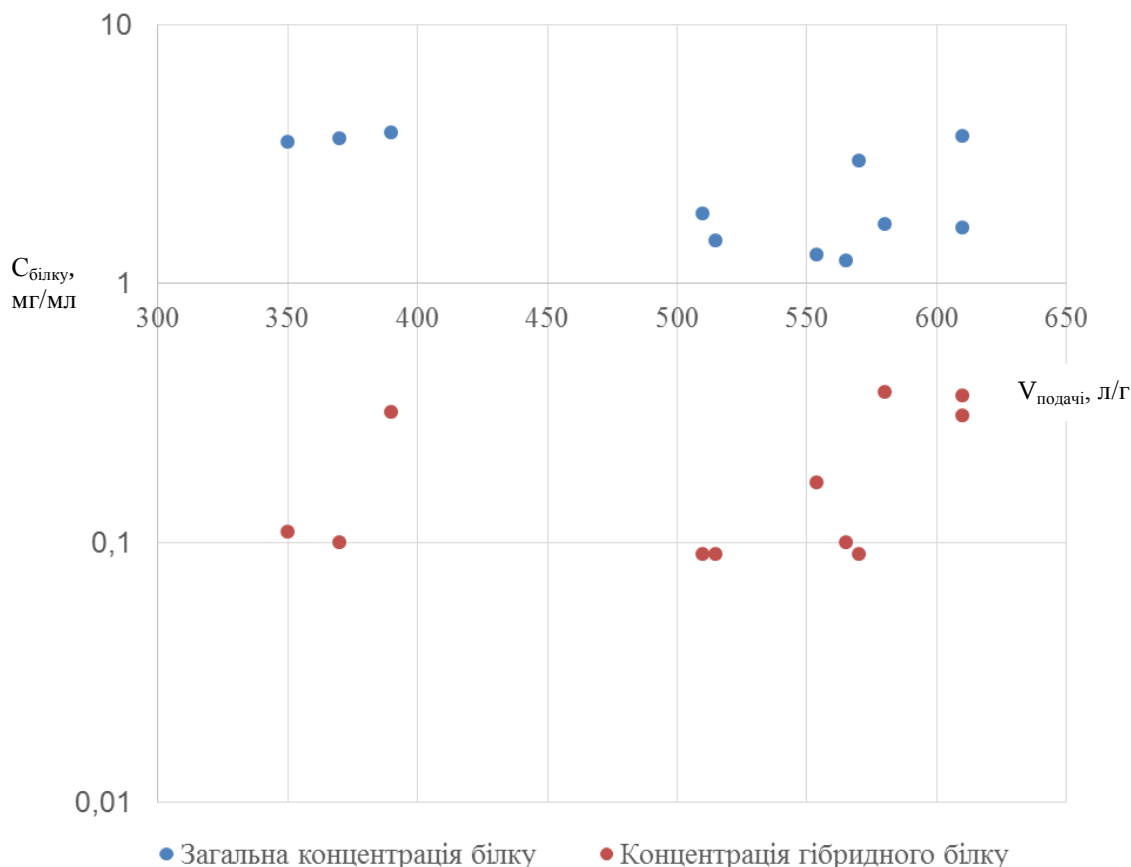


Рисунок 1 – Типові співвідношення вмісту гібридного білку та загального вмісту білку (мг/мл) у фугатах від швидкості подачі суспензії (л/г)

Згідно з рис. 1, типова різниця між вмістом гібридного білку та загальним вмістом білку у фугатах становить порядок величини (за логарифмічною віссю ординат), що свідчить про прийнятний ступінь очищення від баластних білків та низький рівень втрат цільового продукту. Нерегулярний розподіл експериментальних точок пов'язаний із використанням автоматичного регулювання швидкості подачі суспензії.

Таким чином, до простору дизайну оптимальних параметрів відцентрового розділення входить діапазони швидкості подачі суспензії 300–650 л/г та часу між вивантаженнями 250–350 с за максимальної швидкості обертання барабану 11700 об/хв.

Для встановлення в'язкісних характеристик суспензій бактеріальних клітин та ТВ та їх кореляції з вмістом в них сухого залишку, було досліджено залежність в'язкості суспензій на різних етапах їх відмивки та концентрування від швидкості обертання шпінделя за технологічних температур. Характерний вид залежностей наведено на рис. 2.

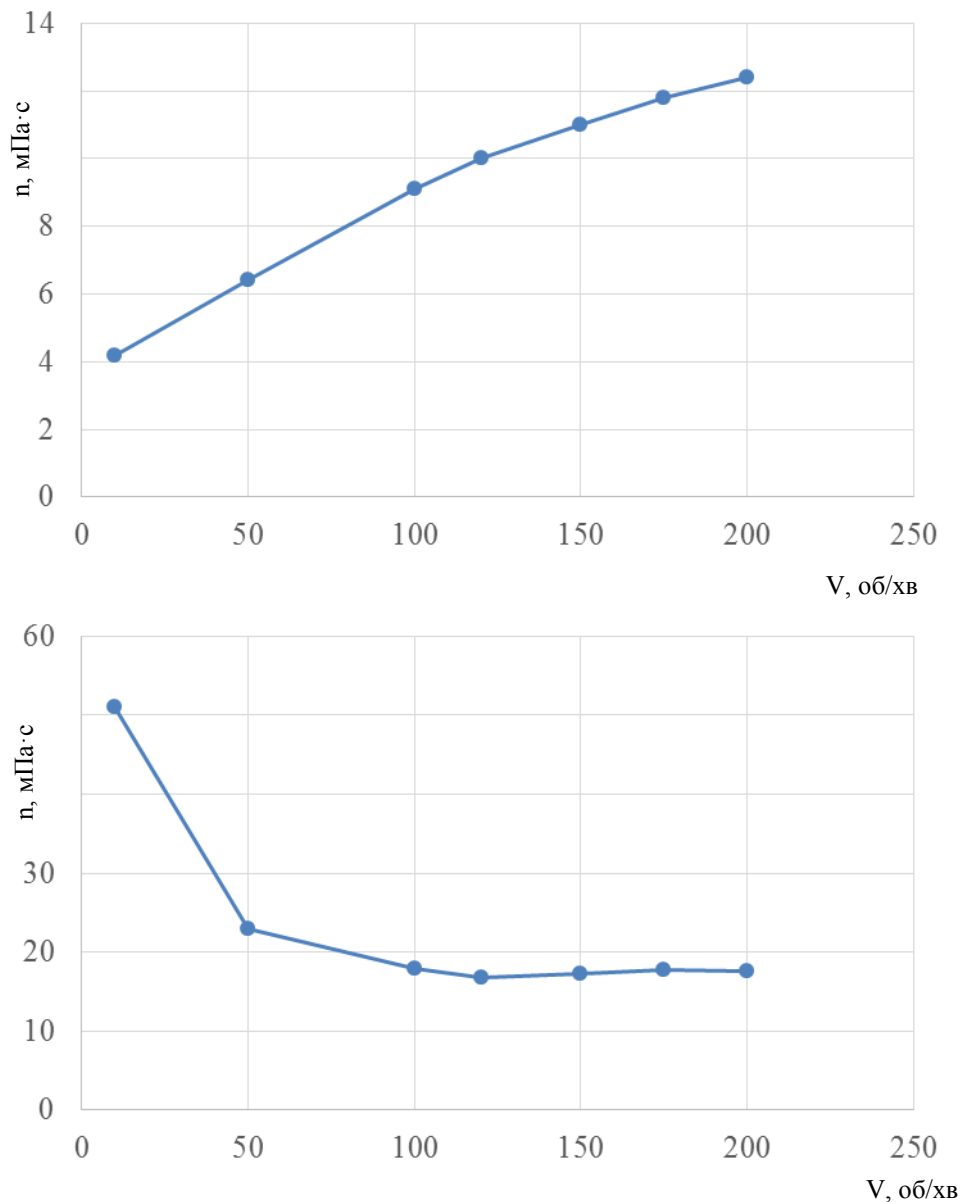


Рисунок 2 – Типові залежності в'язкості суспензій ТВ (мПа·с) від швидкості обертання шпінделя (об/хв) за технологічних температур ($6,0 \pm 1,0$ °C): а) суспензія ТВ після 2-ї дезінтеграції; б) суспензія ТВ після відмивки та концентрування

Встановлено, що, на відміну від суспензії бактеріальних клітин після відмивки та розчину гібридного білку (ГБ) перед рефолдінгом, що характеризуються класичною залежністю в'язкості від швидкості обертання шпінделя, суспензії ТВ, особливо після концентрування, мають некласичну, гелеподібну поведінку (майже на порядок вища в'язкість при малих оборотах), що, ймовірно, зумовлено вмістом нуклеїнових кислот (їх присутність доведено методом електрофорезу в агарозному гелі в роботі [16]). Така поведінка може обґрунтовувати високі пускові струми мішалок, що, в свою чергу, здатне викликати їх аварійне відключення під час запуску, що неодноразово спостерігалося в ході виробничого процесу в умовах ПрАТ «Завод по виробництву інсулінів «Індар» [17].

В якості потенційного рішення зазначеної проблеми запропоновано використання ДНКаз під час відмивки суспензії ТВ. Альтернативою може бути використання нового, потужнішого обладнання, конструкція якого враховує можливість виникнення високих пускових струмів.

Як видно з рис. 2, найбільша різниця між в'язкостями суспензій спостерігається при швидкості обертання шпінделя 10 об/хв. Нормалізована відмінність між зазначеними типами суспензій становить порядок величини. Це добре корелює із вмістом в них сухого залишку (16,3 г/л для суспензії ТВ після 2-ї дезінтеграції та 122,3 г/л суспензії ТВ після відмивки та концентрування), нормалізована відмінність між значеннями якого для зазначених типів суспензій також становить порядок величини. Зазначену кореляцію запропоновано для впровадження в якості індикатору якості концентрування ТВ для поточного контролю технологічного процесу.

Для вирішення проблеми присутності залишків нуклеїнових кислот у ТВ після відмивки та концентрування, в модельних експериментах досліджено вплив різних поверхнево-активних речовин (ПАР) під час відмивки ТВ на повноту видалення нуклеїнових кислот, відсутність втрат продукту при відмивці та повноту розчинення ТВ перед рефолдінгом. Для дослідження обрано такі ПАР, як PEG 300, PEG 400, PEG 600, PEG 1500, ROKamin K15K, ROKwinol 80 та ROKanol CML10.

Результати модельних експериментів, які наведені на рис. 3, свідчать про те, що відмінності у масі сухого залишку ТВ після відмивки досліджуваними ПАР та водою очищеною знаходяться в межах похибки експерименту.

Дані модельних досліджень щодо повноти розчинення ТВ після відмивки досліджуваними ПАР та водою очищеною, наведені на рис. 4, демонструють повніше розчинення після відмивки ПАР у порівнянні з водою очищеною.

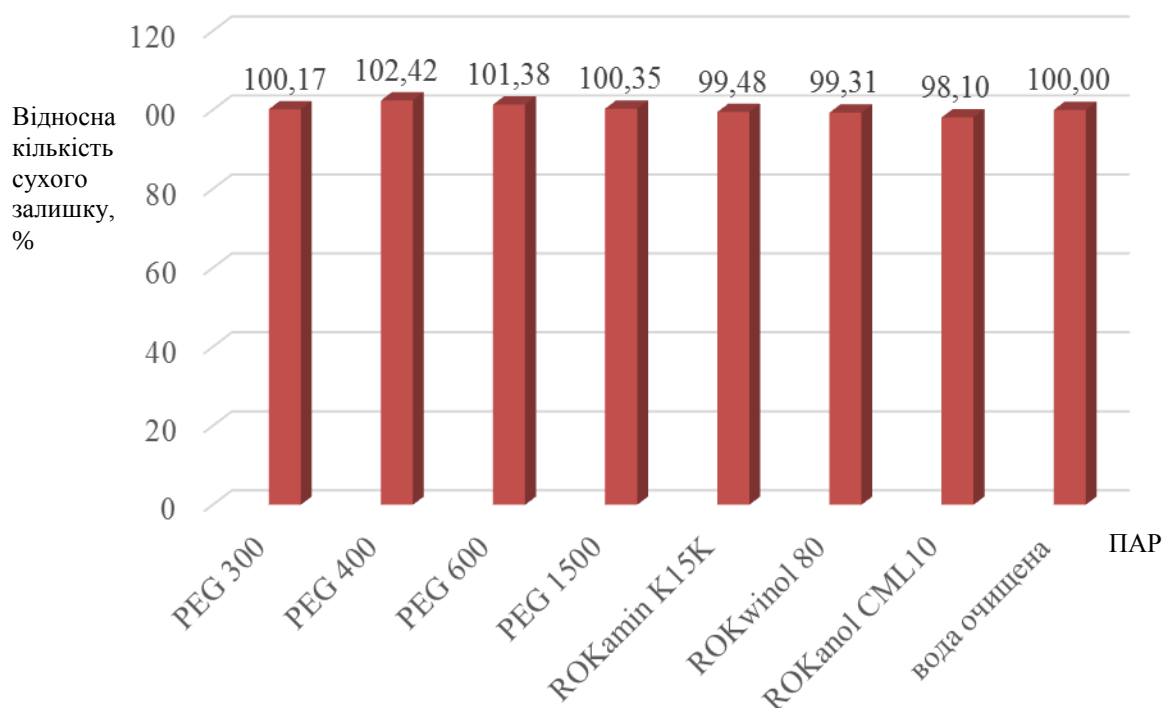


Рисунок 3 – Відсоток маси сухого залишку ТВ після відмивки досліджуваними ПАР до маси сухого залишку ТВ після відмивки водою очищеною

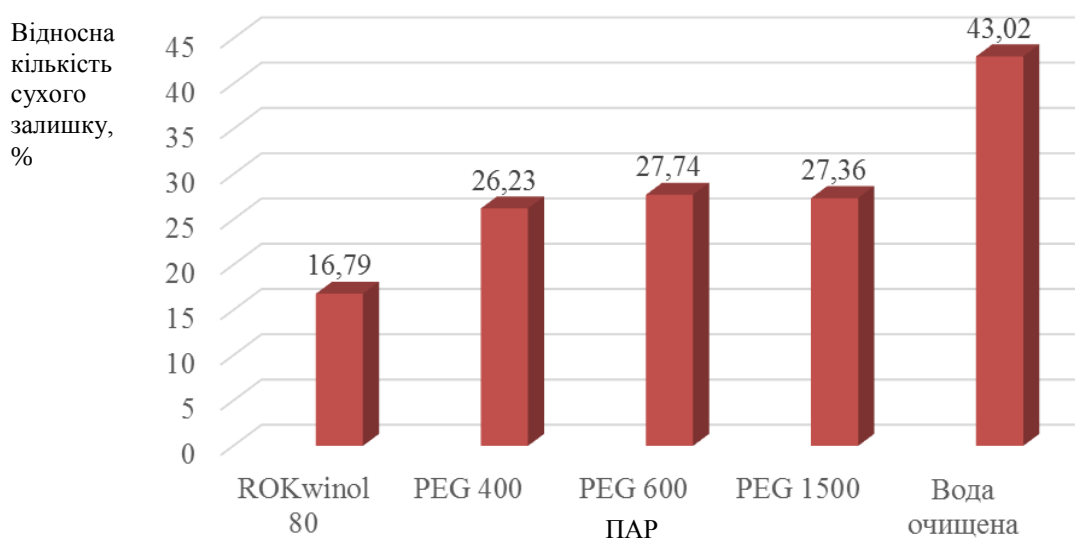


Рисунок 4 – Відсоток маси сухого залишку після розчинення ТВ, відмитих досліджуваними ПАР до маси сухого залишку після розчинення ТВ, відмитих водою очищеною

Дослідження повноти видалення нуклеїнових кислот у модельних експериментах з відмивки ТВ досліджуваними ПАР показали певну доцільність їх застосування в складі розчину для відмивки, хоча досліджувані системи не забезпечили повного видалення нуклеїнових кислот. Кількісна оцінка ступеню видалення є напрямом подальших досліджень. В даному випадку, перспективним способом вирішення проблеми залишків нуклеїнових кислот у відмитих ТВ може бути використання специфічних ферментів для їх гідролізу складі відмивочних розчинів, що також потребує експериментальної перевірки в подальших дослідженнях.

Висновки

Результати досліджень визначили простір дизайну оптимальних параметрів відцентрового розділення, що використовується в процесі виробництва ПрАТ «Завод по виробництву інсулінів «Індар». За результатами визначення параметрів в'язкості технологічних середовищ запропоновано гіпотезу та потенційні шляхи оптимізації параметрів роботи ємнісного обладнання. Встановлено оптимальні параметри відцентрового розділення з урахуванням швидкості подачі суспензії 300–650 л/г та часу між вивантаженнями 250–350 с за максимальної швидкості обертання барабану. Виявлено характерну поведінку суспензії бактеріальних клітин після відмивки та розчину гібридного білку (ГБ) перед рефолдінгом, що характеризуються класичною залежністю в'язкості від швидкості обертання шпінделя, суспензії тілець включення, особливо після концентрування, які мають некласичну, гелеподібну структуру. Запропоновано оптимізувати ефективність процесу видалення залишків нуклеїнових кислот шляхом використання ДНКаз під час відмивки суспензії тілець включення. Виявлено взаємозв'язок між в'язкостями суспензій, швидкістю обертання шпінделя та вмістом в них сухого залишку, що доцільно запровадити як індикатор ефективності концентрування тілець включень для поточного контролю технологічного біопроцесу. Порівняльні дослідження наявних ПАР щодо їх використання у розчині для відмивки ТВ дозволили сформулювати перспективні напрямки подальших досліджень, які передбачатимуть встановлення кількісного впливу ПАР на видалення нуклеїнових кислот, а також застосування специфічних ферментів для їх гідролізу у складі відмивочних розчинів.

Література

1. Baeshen M., AlHejin A. M., Bora R. S., Ahmed M. M. M., Ramadan H. A. I., Saini K. S., Baeshen N. A., Redwan E. M. Production of biopharmaceuticals in *E. coli*: current scenario and future perspectives. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2015. Vol. 25. P. 953-962.
2. Niazi S. K., Magoola M. Advances in *Escherichia coli*-Based Therapeutic Protein Expression: Mammalian Conversion, Continuous Manufacturing, and Cell-Free Production. *Biologics*. 2023. Vol. 3, No. 4. P. 380-401. DOI: <https://doi.org/10.3390/biologics3040021>.
3. Cardoso V. M., Campani G., Santos M. P., Silva G. G., Pires M. C., Gonçalves V. M., Giordano R. C., Sargo C. R., Horta A. C. L., Zangirolami T. C. Cost analysis based on bioreactor cultivation conditions: Production of a soluble recombinant protein using *Escherichia coli* BL21(DE3). *Biotechnology Reports*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00441>.
4. Tripathi N. K., Shrivastava A. Recent Developments in Recombinant Protein-Based Dengue Vaccines. *Frontiers in Immunology*. 2018. Vol. 9. Article 1919. DOI: <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.01919>.
5. Lagousi T., Basdeki P., Routsias J., Spoulou V. Novel Protein-Based Pneumococcal Vaccines: Assessing the Use of Distinct Protein Fragments Instead of Full-Length Proteins as Vaccine Antigens. *Vaccines*. 2019. Vol. 7, No. 1. Article 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/vaccines7010009>.
6. Keikha M., Eslami M., Yousefi B., Ghasemian A., Karbalaee M. Potential antigen candidates for subunit vaccine development against *Helicobacter pylori* infection. *Journal of Cellular Physiology*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/jcp.28870>
7. Overton T. W. Recombinant protein production in bacterial hosts. *Drug Discovery Today*. 2014. Vol. 19, No. 5. P. 590–601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2013.11.008>.
8. Marco A. Recent advances in recombinant production of soluble proteins in *E. coli*. *Microb Cell Fact*. 2025. Vol. 24. Article 21. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-025-02646-8>.
9. Motronenko, V., Lutsenko, T., Galkin, A., Gorshunov, Y., & Solovjova, V. Optimization of the culture medium composition to increase the biosynthesis of recombinant human interleukin-7 in *Escherichia coli*. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2020. No. 9(4), P. 761–68. DOI: <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.9.4.761-768>.
10. Galkin A. Biosafety Management: Emphasis on Medicine, Pharmacy, and Biotechnology. *Innov Biosyst Bioeng*. 2025. No. 9 (2). P. 2-3. URL: <https://ibb.kpi.ua/article/view/329014>.
11. Galkin O. I., Savchenko A. A., Nikitina K. I., Dugan O. M. Obtaining and study of properties of new monoclonal antibodies against human IgE. *Ukrain'skyi Biokhimichnyi Zhurnal*. 2013. No. 85(5), P. 81–87.
12. Walsh G., Walsh E. Biopharmaceutical benchmarks 2022. *Nature Biotechnology*. 2022. Vol. 40. P. 1722–1760. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41587-022-01582-x>.
13. Kothari M., Wanjari A., Acharya S. A comprehensive review of monoclonal antibodies in modern medicine: tracing the evolution of a revolutionary therapeutic approach. *Cureus*. 2024. Vol. 16, No. 6. Article 61983. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.61983>.
14. Lee S.Y. High cell-density culture of *Escherichia coli* (Review). *Trends in Biotechnology*. 1996. Vol. 14, Iss. 3. P. 98–105.
15. Пузир В. Г., Крашенінін О. С., Жовтий Ю. В. Планування експерименту під час наукових досліджень: метод. вказ. Харків : УДУЗТ, 2020. 55 с.

16. Хейломський Д. О., Майстренко Л. А., Мокроусова О. Р. Комплексна оптимізація відмивки бактеріальних клітин та тілець включення у виробництві рекомбінантного інсуліну людини: збірник тез II Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні матеріали та технології: біотехнологія, прикладна хімія, екологія» (30-31 жовтня 2025 р., КНУТД). Київ : КНУТД, 2025. С. 85.

17. Виробництво. ПрАТ «Індар». 2025. URL: <https://indar.com.ua/ua/manufacture>.

Bibliography (transliterated)

1. Baeshen M., AlHejin A. M., Bora R. S., Ahmed M. M. M., Ramadan H. A. I., Saini K. S., Baeshen N. A., Redwan E. M. Production of biopharmaceuticals in *E. coli*: current scenario and future perspectives. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2015. Vol. 25. P. 953-962.

2. Niazi S. K., Magoola M. Advances in *Escherichia coli*-Based Therapeutic Protein Expression: Mammalian Conversion, Continuous Manufacturing, and Cell-Free Production. *Biologics*. 2023. Vol. 3, No. 4. P. 380-401. DOI: <https://doi.org/10.3390/biologics3040021>.

3. Cardoso V. M., Campani G., Santos M. P., Silva G. G., Pires M. C., Gonçalves V. M., Giordano R. C., Sargo C. R., Horta A. C. L., Zangirolami T. C. Cost analysis based on bioreactor cultivation conditions: Production of a soluble recombinant protein using *Escherichia coli* BL21(DE3). *Biotechnology Reports*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00441>.

4. Tripathi N. K., Shrivastava A. Recent Developments in Recombinant Protein-Based Dengue Vaccines. *Frontiers in Immunology*. 2018. Vol. 9. Article 1919. DOI: <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.01919>.

5. Lagousi T., Basdeki P., Routsias J., Spoulou V. Novel Protein-Based Pneumococcal Vaccines: Assessing the Use of Distinct Protein Fragments Instead of Full-Length Proteins as Vaccine Antigens. *Vaccines*. 2019. Vol. 7, No. 1. Article 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/vaccines7010009>.

6. Keikha M., Eslami M., Yousefi B., Ghasemian A., Karbalaee M. Potential antigen candidates for subunit vaccine development against *Helicobacter pylori* infection. *Journal of Cellular Physiology*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/jcp.28870>.

7. Overton T. W. Recombinant protein production in bacterial hosts. *Drug Discovery Today*. 2014. Vol. 19, No. 5. P. 590–601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2013.11.008>.

8. Marco A. Recent advances in recombinant production of soluble proteins in *E. coli*. *Microb Cell Fact*. 2025. Vol. 24. Article 21. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-025-02646-8>.

9. Motronenko, V., Lutsenko, T., Galkin, A., Gorshunov, Y., & Solovjova, V. Optimization of the culture medium composition to increase the biosynthesis of recombinant human interleukin-7 in *Escherichia coli*. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2020. No. 9(4), P. 761–68. DOI: <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.9.4.761-768>.

10. Galkin A. Biosafety Management: Emphasis on Medicine, Pharmacy, and Biotechnology. *Innov Biosyst Bioeng*. 2025. No. 9 (2). P. 2-3. URL: <https://ibb.kpi.ua/article/view/329014>.

11. Galkin O. I., Savchenko A. A., Nikitina K. I., Dugan O. M. Obtaining and study of properties of new monoclonal antibodies against human IgE. *Ukrain'skyi Biokhimichniy Zhurnal*. 2013. No. 85(5), P. 81–87.

12. Walsh G., Walsh E. Biopharmaceutical benchmarks 2022. *Nature Biotechnology*. 2022. Vol. 40. P. 1722–1760. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41587-022-01582-x>.

13. Kothari M., Wanjari A., Acharya S. A comprehensive review of monoclonal antibodies in modern medicine: tracing the evolution of a revolutionary therapeutic approach. *Cureus*. 2024. Vol. 16, No. 6. Article 61983. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.61983>.

14. Lee S.Y. High cell-density culture of *Escherichia coli* (Review). *Trends in Biotechnology*. 1996. Vol. 14, Iss. 3. P. 98–105.

15. Puzyr V. H., Krashenin O. S., Zhovtyi Yu. V. Planuvannia eksperymentu pid chas naukovykh doslidzhen: metod. vkaz. Kharkiv : UDUZT, 2020. 55 p.

16. Kheilomskiy D. O., Maistrenko L. A., Mokrousova O. R. Kompleksna optymizatsiia vidmyvky bakterialnykh klityn Ta tilets vkluchennia u vyrobnytstvi rekombinantnoho insulynu liudyny: zbirnyk tez II Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Innovatsiini materialy ta tekhnolohii: biotekhnolohiia, prykladna khimiia, ekolohiia» (30-31 zhovtnia 2025 r., KNUTD). Kyiv : KNUTD. 2025. P. 85.

17. Vyrobnytstvo. PrAT «Indar». 2025. URL: <https://indar.com.ua/ua/manufacture>.

УДК 615.014.2

I. M. Волошина, канд. техн. наук, доцент, I. O. Грецький, канд. біол. наук, доцент,
O. P. Мокроусова, д-р техн. наук, професор, Д. O. Хейломський, магістр

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДМИВКИ БАКТЕРІАЛЬНИХ КЛІТИН ТА ТІЛЕЦЬ ВКЛЮЧЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ РЕКОМБІНАНТНОГО ІНСУЛІНУ ЛЮДИНИ

В роботі представлено результати досліджень оптимізації параметрів процесу відмивки бактеріальних клітин штаму генно-модифікованого штаму-продуценту рекомбінантного інсуліну людини на основі *Escherichia coli* BL21 від компонентів культурального середовища та відмивки виділених в результаті руйнування зазначених бактеріальних клітин тілець включення від компонентів цитоплазми й клітинного дебрису. Обґрунтовано доцільність досліджень щодо технологічності, виходу та якості очищення цільового продукту на подальших етапах даунстрім-процесу біотехнологічного виробництва рекомбінантного інсуліну людини. В результаті проведених досліджень показано, що діапазони швидкості подачі суспензії на відцентровий сепаратор з автоматичним вивантаженням 300–650 л/г та часу між вивантаженнями 250–350 с за максимальної швидкості обертання барабану 11700 об/хв визначають напрям оптимізації параметрів відцентрового розділення. В процесі оптимізації визначено потенційну причину виникнення високих пускових струмів мішалок в реакторах під час відмивки та розчинення гібридного білку перед рефолдінгом. Запропоновано альтернативні рішення зазначеної проблеми: використання ДНКаз під час відмивки суспензії тілець включення або використання нового, потужнішого обладнання, конструкція якого враховує можливість виникнення високих пускових струмів. Результати досліджень дозволили запропонувати кореляцію порядків величин нормалізованої відмінності між значеннями в'язкості суспензій та вмістом в них сухого залишку для впровадження в якості індикатору якості концентрування тілець включення для контролю біопроцесу. В модельних експериментах досліджено вплив ПАР під час відмивки тілець включення на повноту видалення нуклеїнових кислот, відсутність втрат продукту при відмивці, та повноту розчинення тілець включення перед рефолдінгом. Найбільший рівень повноти розчинення (83,21 %) встановлено після відмивки тілець включення розчином ПАР ROKwinol80. Результати досліджень окреслити простір дизайну оптимальних парамет-

рів відцентрового розділення відповідно до фактичних виробничих умов. За результатами оцінювання параметрів в'язкості технологічних середовищ запропоновано гіпотезу та потенційні шляхи оптимізації параметрів експлуатації ємнісного обладнання. Сформовано перспективні напрямки подальших досліджень щодо кількісного аналізу впливу ПАР на видалення нуклеїнових кислот та застосування специфічних ферментів для їх гідролізу у складі відмивочних розчинів.

Ключові слова: рекомбінантний інсулін, біопроцеси, оптимізація, сепарація, культура бактеріальних клітин, тільки включення, відмивка.

I. M. Voloshyna, I. O. Hretskyi, O. R. Mokrousova, D. O. Kheilomskyi

OPTIMIZATION OF WASHING PARAMETERS FOR BACTERIAL CELLS AND INCLUSION BODIES IN THE PRODUCTION OF RECOMBINANT HUMAN INSULIN

The paper presents the results of research on the optimisation of the parameters of the washing process of bacterial cells of the genetically modified strain producing recombinant human insulin based on *Escherichia coli* BL21 from the components of the culture medium and washing of inclusion bodies isolated as a result of the destruction of the specified bacterial cells from the components of the cytoplasm and cell debris. The feasibility of research on the technological aspects, yield, and quality of purification of the target product at subsequent stages of biotechnological recombinant human insulin production is substantiated. The research has shown that the ranges of suspension feed rates to a centrifugal separator with automatic unloading, 300–650 l/h, and the time between unloading, 250–350 s, at a maximum drum rotation speed of 11,700 rpm, determine the direction of optimisation of the centrifugal separation parameters. During the optimisation process, the potential cause of high starting currents in agitators of reactors during the washing and dissolution of hybrid proteins before refolding was identified. Alternative solutions to this problem were proposed, including the use of DNase during the washing of inclusion body suspensions and the development of new, more powerful equipment that takes into account the possibility of high starting currents. The research results enabled the proposal of a correlation between the orders of magnitude of the normalized difference in viscosity values between suspensions and their dry residue content, which can serve as an indicator of the quality of inclusion body concentration for bioprocess control. In model experiments, the influence of surfactants on the completeness of nucleic acid removal during the washing of inclusion bodies, the absence of product loss during washing, and the completeness of dissolution of inclusion bodies before refolding was investigated. The highest level of dissolution completeness (83.21 %) was established after washing the inclusion bodies with ROKwinol80 surfactant solution. The research results outline the design space for optimal centrifugal separation parameters in accordance with actual production conditions. Based on the results of the assessment of the viscosity parameters of technological media, a hypothesis and potential ways to optimise the operating parameters of capacitive equipment were proposed. Promising directions for further research have been identified regarding the quantitative analysis of the effect of surfactants on the removal of nucleic acids and the use of specific enzymes for their hydrolysis in washing solutions.

Keywords: recombinant insulin, bioprocesses, optimisation, separation, bacterial culture, inclusion bodies, washing.

С. Л. Лігезін¹, Ph.D. мол. наук. співроб., С. О. Рябінін¹, Ph.D. ст. наук. співроб.,
О. Ю. Федоренко¹, д-р техн. наук, професор, В. О. Верещак², мол. наук. співроб.,
А. В. Захаров¹, канд. техн. наук, заст. зав. НДЧ,
М. М. Будьонний³, канд. техн. наук, пров. інженер

УНІФІКОВАНИЙ УТИЛІЗАЦІЙНИЙ КУМУЛЯТИВНИЙ ЗАРЯД ДЛЯ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

² Державна наукова установа «Науково-технологічний комплекс
«Інститут монокристалів» Національної академії наук України», Харків

³ ДП «Харківстандартметрологія»

Ключові слова: утилізаційний кумулятивний заряд, гуманітарне розмінування, контрольований підрив, технологія 3D-друку, високонаповнений філамент, дисперсність наповнювача, технологічні властивості композиту.

Вступ. Однією з актуальних проблем сучасності залишається наявність вибухо-небезпечних залишків війни, що створюють значну загрозу для мирного населення та перешкоджають соціально-економічному розвитку постраждалих територій. Майже через три роки після початку повномасштабного вторгнення Росії наша країна стала найбільш замінованою серед країн світу: до 26 % території України «засіяно» вибухо-небезпечними боєприпасами. Значна частина сільськогосподарських угідь та земель, що підлягають охороні, ймовірно, буде недоступною протягом багатьох років, що ставить складні питання щодо майбутнього цих територій та їхніх мешканців [1]. У цьому контексті особливого значення набуває гуманітарне розмінування, яке потребує ефективних, безпечних, технологічно простих та економічно доцільних технічних рішень. Одним з перспективних напрямів є застосування малогабаритних утилізаційних кумулятивних зарядів (УКЗ) для контрольованого підриву мін та боєприпасів шляхом спрямованого енергетичного впливу [2].

Розробка нових технологій виготовлення інженерних засобів для гуманітарного розмінування є важливим завданням, вирішення якого обумовлює ефективність робіт фахівців для швидкого повернення постраждалих від війни територій країни до безпечного життя [3]. Виготовлення УКЗ з використанням адитивних технологій, зокрема 3D-друку, відкриває нові можливості щодо підвищення гнучкості конструктивних рішень, зниження маси та вартості виробів, а також локалізації виробництва в умовах обмеженого ресурсу [4]. 3D-друк дозволяє створювати складні геометричні форми. В свою чергу, удосконалення складу високонаповнених матеріалів на основі полімерів із функціональними наповнювачами має забезпечити необхідний рівень міцності, термостійкості та енергетичної ефективності виробів [5].

У межах даної роботи передбачено створення експериментальних зразків малих кумулятивних зарядів, оптимізацію їхньої геометрії та технології друку, а також оцінку їх ефективності на основі SWOT-аналізу. Отримані результати створять основу для формування нових підходів до виготовлення інженерних засобів гуманітарного розмінування, орієнтованих на безпеку, мобільність та технологічну незалежність.

Об'єкт дослідження та його технологічний аудит. Об'єкт дослідження – утилізаційні кумулятивні заряди (УКЗ), призначені для безпечного знешкодження боеприпасів із неповною детонацією або для ініціювання заряду вибухової речовини шляхом спрямованого підриву та попередження наслідків від неконтрольованого вибуху боеприпасів. Технологічний аудит УКЗ виявляє недостатню вивченість питання технології їх 3D-друку високонаповненим філаментом, що уповільнює процес виготовлення, здорожчає та ускладнює виробництво. Крім того, недоопрацьованими залишаються питання забруднення ґрунтів рештками УКЗ та можливих шляхів виключення їх негативного впливу на довкілля.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи – дослідження можливості використання високонаповнених філаментів для утилізаційних кумулятивних зарядів, призначених для гуманітарного розмінування, шляхом 3D друку.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- дослідити існуючі рішення проблеми, визначити невирішені питання для масштабування технології 3D-друку УКЗ;
- розробити склади високонаповнених металовмісних філаментів для виготовлення кумулятивних воронок для УКЗ;
- дослідити технологічні властивості одержаних композитних філаментів;
- визначити переваги і недоліки використання для 3D друку кумулятивних воронок і вражаючих елементів та провести SWOT-аналіз результатів дослідження.

Дослідження існуючих рішень проблеми. Малогабаритні УКЗ призначені для безпечного розмінування (утилізації) боеприпасів, які неможливо вилучити, через що доводиться їх знешкоджувати на місці виявлення. Це відбувається шляхом підриву спрямованої дії, що призводить до руйнації (часткової або повної) корпусів боеприпасів [6]. Відповідно, такий процес забезпечує подальшу роботу з залишковою вибуховою речовиною у снарядах. Важливим є те, що при використанні малих кумулятивних зарядів (МКЗ) відсутні негативні наслідки від штатного вибуху боеприпасів. Зокрема: руйнація об'єктів, забруднення навколишньої території осколками, зміна рельєфу місцевості [7].

Для 3D-друку деталей, які потребують високої міцності, жорсткості, термостійкості або інших спеціальних властивостей використовують високонаповнені філаменти. Високонаповнений філамент – це матеріал, в який додано велику кількість наповнювачів. У порівнянні зі звичайним філаментом такі наповнювачі як скловолокно, вуглецеве волокно, метал або кераміка значно покращують властивості виробів: міцність, твердість, температурну стійкість [8, 9]. Можливість варіювання властивостей залежить від виду наповнювача, що дозволяє використовувати їх у широкому спектрі застосувань. Для збільшення міцності і жорсткості виробів як наповнювачі можна використовувати скловолокно; для зниження густини при одночасному збільшенні міцності доцільним є використання вуглецевого волокна; використання як наповнювача металів покращує теплопровідність, а застосування керамічних наповнювачів дозволяє підвищити абразивну і температуростійкість [10, 11].

Основними перевагами високонаповнених філаментів є:

- підвищені фізико- механічні властивості дозволяють створювати більш надійні деталі;
- підвищена температуростійкість при використанні жаростійкого наповнювача дозволяє використовувати надруковані деталі в умовах високих температур;
- зменшена усадка забезпечує кращу точність друку.

На наш погляд, 3D-друк високонаповненим філаментом є дуже перспективним для виготовлення кумулятивних воронок різних форм, від класичних до воронок, що утворюють ударні ядра (рис. 1). Як видно з рис. 1, деякі види кумулятивних воронок через змінну конусність та товщину мають досить складну форму та профіль, але при друці на це майже не потрібно звертати увагу, що дозволить створювати воронки різних калібрів для знешкодження вибухонебезпечних предметів з урахуванням їх особливостей.

Визначення комплексної діелектричної проникності ВВКМ, згідно з представленою моделлю, може бути реалізоване із застосуванням метода високочастотної діагностики, що дозволяє реєструвати зміну $\varepsilon'(\omega)$ та $\varepsilon''(\omega)$ у широкому частотному діапазоні. На рисунку 1 наведено характерну частотну залежність дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності для ВВКМ, змодельовану на основі моделі Максвелла-Вагнера.

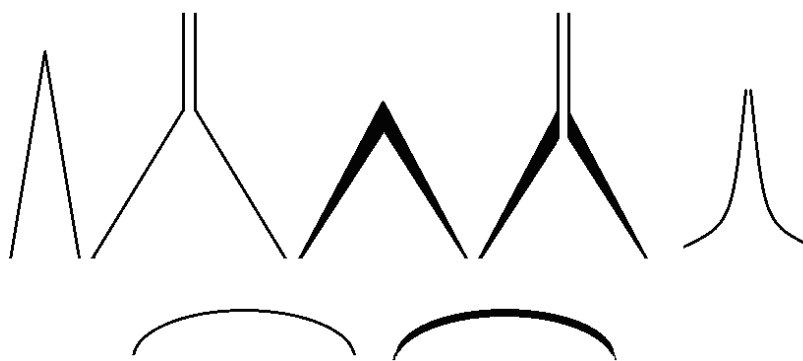


Рисунок 1 – Приклади кумулятивних воронок різних форм, доступних до друку

Завдяки можливості створення металофіламентів заданого складу, можна виготовляти кумулятивні воронки, з використанням різних наповнювачів – металів та їхніх сумішей, а також природних неметалів. Таким чином, завдяки корегуванню складу металофіламентів можна досягати бажаної ефективності з точки зору бронепробиття за умови мінімальної собівартості виробництва. Для підвищення здатності УКЗ до бронепробиття до філаменту в якості складової наповнювача слід вводити високощільні метали (наприклад, вольфрам), що дозволить підвищити густину композиту для збільшення кумулятивного потоку [12]. Для ілюстрації вищевикладеного наводимо, як приклад, дані щодо впливу добавки вольфраму до складу суміші на основі міді (табл. 1).

Таблиця 1 – Умовний приріст густини сумішей на основі міді, допованої вольфрамом, за результатами прогнозного розрахунку

Вміст вольфраму, мас. %	Умовна густина суміші, г/см ³	Приріст умовної густини суміші Cu–W відносно чистої міді	Зміна собівартості виробу, %
0	8,96	1,00	–
5	9,47	1,06	+3,89
10	9,99	1,11	+7,78
15	10,50	1,17	+11,67
20	11,02	1,23	+15,55
25	11,53	1,29	+19,44

Ці дані, одержані розрахунковим шляхом з використанням адитивного методу не враховують хімічних взаємодій, але в достатній мірі характеризують порядок значень умовної густини сумішей системи «Cu–W» при використанні як наповнювача метало-полімерних філаментів для виготовлення кумулятивних воронок.

Завдяки можливості створення різних сумішей металів можна підібрати такі що задовольнятимуть як за ефективністю дії (ступенем бронепробиття), так і за вартістю. Для зменшення собівартості виробу слід також розглянути можливість створення кумулятивних керамічних воронок з використанням дешевих природних мінеральних наповнювачів. Але ці ідеї всі вимагають проведення додаткових досліджень для визначення впливу складу метало-полімерних і не металополімерних композитів на рівень потужності кумулятивних воронок та їхньої придатності при використанні для утилізації різних вибухонебезпечних предметів.

Обговорення результатів досліджень

В рамках проведених досліджень був розроблений склад високонаповненого філаменту на основі мідно-полімерної композиції для 3D друку кумулятивної воронки. Слід зазначити, що технологічні властивості високонаповнених філаментів для 3D друку залежать у великій мірі від дисперсності часток наповнювача. Враховуючи цей факт в задачу досліджень входило визначення технологічно оптимального фракційного складу порошку наповнювача для PLA-філаментів з високим ступенем наповнення.

Мідний порошок, який використовували як основну складову наповнювача, отримували хімічним відновленням водорозчинної мідної солі органічним відновником у водному середовищі. Як відомо, розміри часток металу, одержаних таким способом, залежать від тривалості хімічної реакції відновлення. Одержання мікронізованих порошоків різної дисперсності здійснювали шляхом контролю температури реакції та варіювання швидкості внесення органічного відновника, що дозволяло регулювати тривалість процесу відновлення міді. Утворення найбільш дисперсних часточки (0,1-0,5 мкм) відбувалось за температури, близької до температури початку відновлення міді, але швидкість реакції в цьому випадку є мінімальною, а тому синтез в таких умовах не матиме практичного значення через надзвичайно велику тривалість та енерговитрати на роботу обладнання (мішалок, термостатів тощо).

З використанням отриманих порошоків досліджували вплив дисперсності наповнювача для забезпечення необхідних для стабільної екструзії та якісного друку технологічних властивостей філаменту. Експериментально встановлено, що дрібнодисперсний мідний наповнювач (нано- та субмікронний діапазон) краще диспергується у PLA і забезпечує отримання більш рівномірної мікроструктури філаменту. Натомість частки розміром від 10 до 100 мкм і більше схильні створювати агломерати, які порушують плинність розплаву та можуть спричинити виникнення дефектів при екструзії через закупорку сопла та неоднорідність суміші. В той же час надто дрібні частки можуть зробити матеріал занадто в'язким для екструзії, оскільки зменшення розмірів часток і збільшення питомої поверхні порошку наповнювача викликає підвищення в'язкості внаслідок зростання інтенсивності міжфазних взаємодій. Це може викликати небажане підвищення тиску у соплі, що призводить до нерівномірної подачі.

Слід зазначити, що грубодисперсні частки «забивають» сопло. Крім того вони діють як концентратори напружень, які можуть викликати появу мікротріщин, особливо при високому ступені наповнення філаменту (понад 50 %) [13]. Натомість дисперсні частки мають кращу адгезію з полімером, що в кінцевому рахунку дозволяє одержати більш міцний та ударостійкий виріб. Крім того, тонкодисперсний наповнювач забезпе-

чує більш рівномірне нагрівання і охолодження шарів. Однак, нанорозмірні часточки з одного боку дозволяють покращити механічні властивості виробу, а з іншого вимагають ретельного диспергування та поверхневої модифікації. На наш погляд, використання нанорозмірних наповнювачів є економічно недоцільним через порівняно високу вартість і складну технологію їх одержання.

Враховуючи вищевикладені спостереження, що ґрунтуються на практичному досвіді, зроблено висновок, що збільшення розмірів часток наповнювача понад 50 мкм негативно позначається на процесах екструзії і друку. Оптимальним для високонаповнених PLA більш тонкої, втім не нанодисперсної фракції наповнювача з вузьким розподілом розмірів часток у діапазоні ~1–10 мкм. Слід також враховувати, що при використанні ультрадисперсного наповнювача з високою твердістю є ризик абразивного зношування сопла та шнека через високу питому поверхню порошку. В такому разі слід використовувати карбідні сопла або ті, які виготовлені із загартованих сталей.

Друк воронки здійснювали з використанням високонаповненого філаменту, виготовленого з мідно-полімерного композиту, що містив 20 мас. % PLA і 80 мас. % наповнювача, до складу якого входили ультрадисперсні порошки міді і вольфраму у співвідношенні 15:1 (рис. 2а). Фото філаменту, виготовленого на лабораторному екструдері (рис. 2б), надано на рисунку 2в.

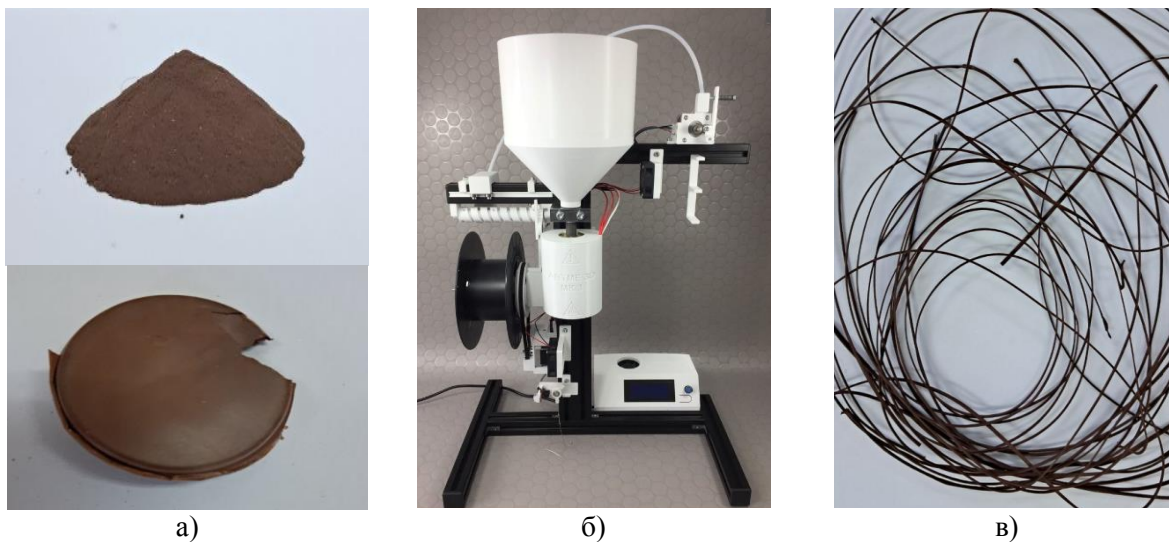


Рисунок 2 – Фотоілюстрація виготовлення високонаповненого філаменту:
а) високонаповнений мідно-полімерний композит; б) лабораторний екструдер;
в) філамент для друку воронки

Креслення і 3D модель кумулятивної воронки представлені на рисунку 3.

Друк кумулятивної воронки здійснювали на лабораторному 3D принтері (рис. 4а). Тривалість друку воронки при використанні програми Cuga соплом 0,6 мм при висоті шару 0,4 мм становила 26 хв. Вага готової воронки 11 г. Зовнішній вигляд надрукованої воронки представлений на рис. 4б. Слід також зазначити, що класичні кумулятивні воронки, надруковані з використанням філаменту на основі металополімерних композитів, не вимагають додаткової термічної обробки, що є їх беззаперечною перевагою.

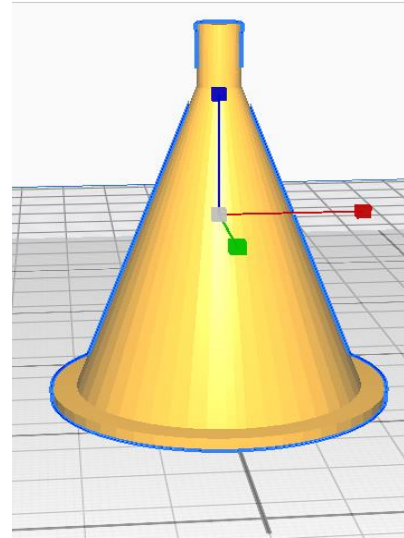
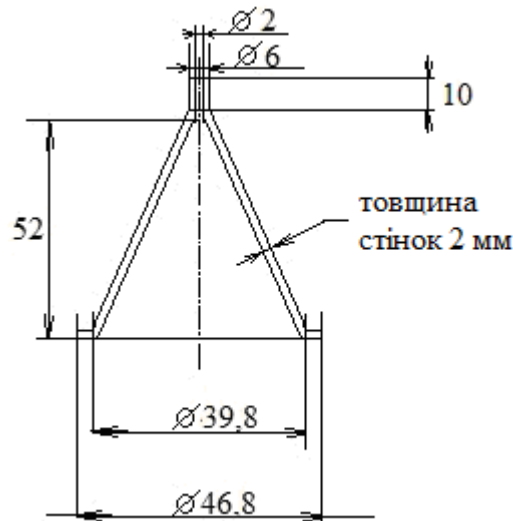


Рисунок 3 – Креслення та 3D модель кумулятивної воронки



а)

б)

Рисунок 4 – Фотоілюстрація друку композитної мідно-пластикової кумулятивної воронки, виготовленої за вищевказаним кресленням

На 3D принтерах можна друкувати як кумулятивні воронки різних форм і розмірів (див. рис. 1), так і повні комплекти УКЗ. Можливе найпростіше, на наш погляд, виконання УКЗ ілюструє рисунок 5. Технологічна схема виготовлення УКЗ такого типу включає такі операції:

- 1) друк різьбової кришки з отвором під детонатор;
- 2) друк кумулятивної воронки;
- 3) друк фокусної трубки для правильного формування кумулятивного потоку;
- 4) друк трубки для спорядження вибуховою речовиною;
- 5) зборка УКЗ;
- 6) складання комплектів з різних калібрів УКЗ та їх пакування.

Серед переваг повного 3D друку УКЗ слід назвати наступні:

- повна локалізація та децентралізація виробництва;
- можливість друкувати УКЗ різних форм-факторів і діаметрів;
- УКЗ легко збирається з базового конструктору безпосередньо на місці;
- надзвичайно низька собівартість одного виробу, як з точки зору грошового еквіваленту так і з точки зору витрат людино-годин на виріб.

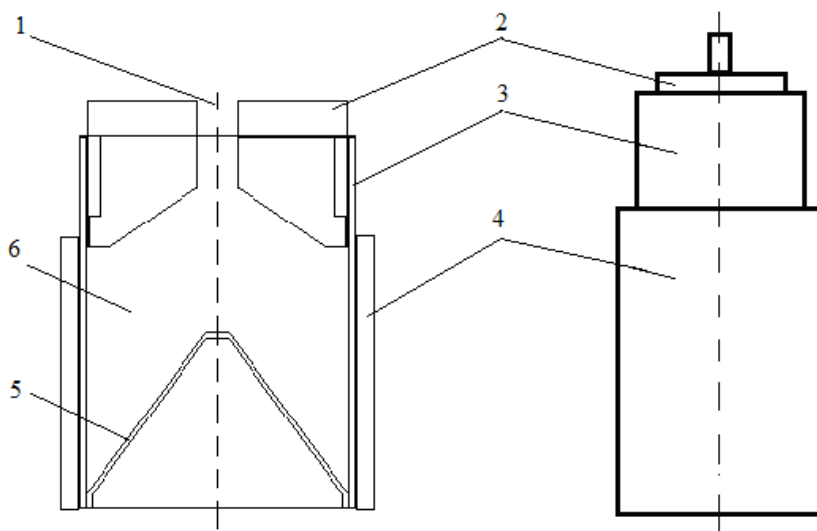


Рисунок 5 – Принципове креслення утилізаційного кумулятивного заряду УКЗ (один з можливих варіантів виконання): 1 – місце під детонатор, 2 – друкована різьбова кришка з отвором під детонатор; 3 – трубка для спорядження ВР; 4 – фокусна трубка для правильного формування кумулятивного потоку; 5 – кумулятивна воронка; 6 – вибухова речовина

На рисунку 6 продемонстровано вигляд готового неспорядженого УКЗ на штативі.



а)



б)

Рисунок 6 – Зовнішній вигляд надрукованого УКЗ

Така технологія дозволяє виготовляти і більш складні вироби для отримання лінійних утилізаційних кумулятивних зарядів (ЛУКЗ). Також готовий виріб можна додатково модифікувати без суттєвої переробки для роботи з роботизованими системами чи дистанційним підривом. Враховуючи умови застосування, УКЗ також доцільно використовувати для утилізації для дефрагментації корпусів боєприпасів.

SWOT-аналіз результатів дослідження. Сильним сторонами (S – Strengths) запропонованої розробки є використання як наповнювача ультрадисперсного порошку міді з додаванням вольфраму, що забезпечує високу густину композиту, що є критично важливим для формування кумулятивного струменя з високою пробивною здатністю. Застосування як матричного матеріалу PLA є вигідним з економічної та екологічної точок зору: цей полімер є доступним у великій кількості і має відносно низьку вартість; в природних умовах він здатний до біодеструкції, що виключає засмічення земель залишками використаних УКЗ. Перевагами виготовлення виробів шляхом 3D-друку є гнучкість дизайну: є можливість швидко змінювати геометрію лійки для адаптації до різних задач, а також використання пасивної вставки (лінзи), яка збільшує швидкість обтискання прилеглих до верхівки лійки ділянок облицювання за рахунок скорочення кута між ним і фронтом детонаційної хвилі. Крім того така технологія здатна забезпечити повний цикл виробництва без складного металообробного обладнання лише за допомогою FDM-принтера. Важливими позитивними факторами є також зменшення складності конструкції ваги УКЗ у порівнянні з металевими аналогами, а також безпечність виробів при транспортуванні та спорядженні з точки зору утворення вражаючих елементів, оскільки всі деталі виробу виготовлені з полімер матричного композиту.

Серед недоліків (W – Weaknesses) слід назвати недостатню адгезію твердого наповнювача до PLA, що при використанні надмірної кількості наповнювача підвищує крихкість композиту та може спричинити виникнення мікротріщин під час виникнення ударних навантажень при транспортуванні. Крім того, слід враховувати, що філаменти з високим вмістом твердих неорганічних наповнювачів (80 % і більше) потребують особливих умов друку, зокрема зменшення швидкості. Також, необхідно зважати на те, що абразивні частки W або кераміки швидко зношують латунні/мідні сопла, що в ідеалі потребуватиме використання високовартісних сопел (загартованих сталевих або сапфірових тощо).

Характеризуючи (O – Opportunities), тобто можливості і шляхи удосконалення розробки слід зосередитись на оптимізації складу композиту, а саме на розробці полімерної матриці з поліпшеною адгезією до твердих наповнювачів (наприклад, модифікований PLA або суміш PLA/PETG), а також дослідити можливість заміни порошку Cu/W на дешевші (наприклад, Fe₃O₄), що дозволить зменшити собівартість УКЗ. Розглядаючи можливості підвищення ефективності технології, слід розглянути потенціал мобільних виробництв – створення мобільних лабораторій друку з розгорнутим обладнанням у вантажних автомобілях або в контейнерах. Також важливим, на наш погляд, є вирішення питання масштабування виробництва УКЗ для участі в міжнародних проєктах з гуманітарного розмінування.

Серед загроз (T – Threats), що здатні загальмувати впровадження розробки, можна назвати, по-перше, відмінності регуляторних обмежень на поводження із вибухонебезпечними речовинами у різних країнах; по-друге – це ризик деградації УКЗ, виготовлених з композиту на основі PLA при тривалому зберіганні в умовах підвищеної вологості, що може спричинити втрати точності лінійних розмірів кумулятивного конусу. Серед технологічних ризиків слід назвати уповільнення швидкості друку та необхідність ретельного контролю параметрів друку. Крім того, висока ціна порошку вольфраму обумовлює певні обмеження для широкого використання та залежність від постачальників.

Висновки. Застосування 3D-друку з високонаповнених філаментів відкриває нові можливості для створення ефективних і доступних утилізаційних кумулятивних

зарядів, які призначені для безпечного знешкодження боєприпасів безпосередньо на місці виявлення у випадку якщо їх неможливо вилучити.

В результаті проведених досліджень встановлено вплив дисперсності часток наповнювача на технологічні властивості філаменту та виробів з нього. Показано, що із зменшенням середніх розмірів часток від грубодисперсних (понад 50 мкм) до високодисперсних (в межах 1–10 мкм) відбувається суттєве підвищення міцності виробів (в 2,5 рази), однак помітно погіршується плинність високонаповненої (80 %) розплавленої маси: показник текучості розплаву (ПТР) дослідного композиту становить 5,1 г/10 хв, що уповільнює процес екструзії і вимагає більшої потужності екструдера. Щодо електроопору дослідної полімерної дисперсії, то рівень його залишається близьким до аналогічного показника PLA (2,99·10¹³ Ом·мм²/м і 10¹³ Ом·мм²/м відповідно). Цей факт пояснюється тим, що часточки металів у процесі перемішування розплавленої маси вкриваються шаром полімеру, що виключає їх контактування між собою, а отже теплопровідність і електропровідність композиту відповідають показникам його безперервної фази, тобто PLA. Експериментально встановлено, що оптимальна дисперсність часток наповнювача знаходиться в межах 1–10 мкм.

Результати експериментів підтверджують доцільність використання адитивних технологій для виготовлення УКЗ для гуманітарного розмінування, які стануть у пригоді при знешкодженні боєприпасів із неповною детонацією або для ініціювання заряду вибухової речовини боєприпасу на невеликій відстані. На основі проведеного SWOT-аналізу та виявлених внутрішніх і зовнішніх факторів для різних типів їхньої взаємодії обрано основні та допоміжні стратегії для різних сценаріїв розвитку та визначено пріоритетні напрямки подальших досліджень. Розробка має високу прикладну цінність і потенціал до масштабування, проте потребує технологічної оптимізації матеріалу й друку. Зокрема – підвищення термостійкості PLA, покращення зчеплення з наповнювачами та підбір оптимального складу. Подальші дослідження також будуть спрямовані на масштабування виробництва, автоматизацію процесу зборки та адаптацію зарядів до використання з безпілотними платформами. За умови кваліфікованої підтримки запропоновані інженерні рішення можуть стати проривом у напрямку доступних засобів розмінування.

Література

1. Vasyliuk O. Danger! Mines! The terrible environmental and human cost of Ukraine's minefields. *Ukraine War Environmental Consequences Work Group*. URL: <https://uwecworkgroup.info/danger-mines-the-terrible-environmental-and-human-cost-of-ukraines-minefields/> (дата звернення: 27.08.2025).
2. Park J., Kwon S. Study on the Penetration Performance of a Double-Angle Linear Shaped Charge: Performance Improvement and Miniaturization. *Aerospace*. 2024. Vol. 11. P. 310. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace11040310>.
3. *Humanitarian demining of Ukraine: a problem for 30 years*. URL: <https://ua-energy.org/en/posts/28-01-2025-5aac62ba-1c5b-4567-8125-c00639a1ca71> (дата звернення: 27.08.2025).

4. Xue H., Zhou Q., Xiao C., Huang G. Perspectives on additive manufacturing for warhead applications. *Defence Technology*. 2025. Vol. 43. P. 225–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.02.010>.
5. Angelopoulos P. M., Samouhos M., Taxiarchou M. Functional fillers in composite filaments for fused filament fabrication: a review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37, Part 4. P. 4031–4043. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.069>.
6. Walters W. P., Zukas J. A. *Fundamentals of shaped charges*. New York 1989. 398 p. ISBN 0-471-62172-2.
7. Baker E. L., Daniels A., Defisher S., Al-Shehab N., Ng K. W., Fuchs B. E., Cruz F. Development of a small shaped charge insensitive munitions threat test. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 103. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.04.005>.
8. Chacón J. M., Caminero M. A., Núñez P. J., García-Plaza E., García-Moreno I., Reverte J. M. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties. *Composites Science and Technology*. 2019. Vol. 181. P. 107688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107688>.
9. Shanmugam V., Johnson Rajendran D. J., Babu K., Rajendran S., Veerasimman A., Marimuthu U., Singh S., Das O., Neisiany R. E., Hedenqvist M. S., Berto F., Ramakrishna S. The mechanical testing and performance analysis of polymer–fibre composites prepared through additive manufacturing. *Polymer Testing*. 2021. Vol. 93. P. 106925. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106925>.
10. Majewski T., Trzciński W. A., Szymańczyk L. Studying the Effectiveness of Shaped Charge Jets Created by Graphene-containing Shaped Charge Liners. *Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa. Probl. Mechatronics. Armament Aviat. Saf. Eng.* 2024. Vol. 15, No. 1. P. 39–54. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4487>.
11. Liu Z., Lei Q., Xing S. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8, iss. 5. P. 3741–3751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034>.
12. Dong L. L., Ahangarkani M., Chen W. G., Zhang Y. S. Recent progress in development of tungsten-copper composites: fabrication, modification and applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018. Vol. 75. P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2018.03.014>.
13. Lambos N., Vosniakos G.-C., Papazetis G. Low-cost automatic identification of nozzle clogging in material extrusion 3D printers. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 51. P. 274–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.039>.

Bibliography (transliterated)

1. Vasyliuk O. Danger! Mines! The terrible environmental and human cost of Ukraine's minefields. *Ukraine War Environmental Consequences Work Group*. URL: <https://uwecworkgroup.info/danger-mines-the-terrible-environmental-and-human-cost-of-ukraines-minefields/> (дата звернення: 27.08.2025).

2. Park J., Kwon S. Study on the Penetration Performance of a Double-Angle Linear Shaped Charge: Performance Improvement and Miniaturization. *Aerospace*. 2024. Vol. 11. P. 310. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace11040310>.
3. *Humanitarian demining of Ukraine: a problem for 30 years*. URL: <https://ua-energy.org/en/posts/28-01-2025-5aac62ba-1c5b-4567-8125-c00639a1ca71> (дата звернення: 27.08.2025).
4. Xue H., Zhou Q., Xiao C., Huang G. Perspectives on additive manufacturing for warhead applications. *Defence Technology*. 2025. Vol. 43. P. 225–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.02.010>.
5. Angelopoulos P. M., Samouhos M., Taxiarchou M. Functional fillers in composite filaments for fused filament fabrication: a review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37, Part 4. P. 4031–4043. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.069>.
6. Walters W. P., Zukas J. A. *Fundamentals of shaped charges*. New York 1989. 398 p. ISBN 0-471-62172-2.
7. Baker E. L., Daniels A., Defisher S., Al-Shehab N., Ng K. W., Fuchs B. E., Cruz F. Development of a small shaped charge insensitive munitions threat test. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 103. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.04.005>.
8. Chacón J. M., Caminero M. A., Núñez P. J., García-Plaza E., García-Moreno I., Reverte J. M. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties. *Composites Science and Technology*. 2019. Vol. 181. P. 107688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107688>.
9. Shanmugam V., Johnson Rajendran D. J., Babu K., Rajendran S., Veerasimman A., Marimuthu U., Singh S., Das O., Neisiany R. E., Hedenqvist M. S., Berto F., Ramakrishna S. The mechanical testing and performance analysis of polymer–fibre composites prepared through additive manufacturing. *Polymer Testing*. 2021. Vol. 93. P. 106925. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106925>.
10. Majewski T., Trzcíński W. A., Szymańczyk L. Studying the Effectiveness of Shaped Charge Jets Created by Graphene-containing Shaped Charge Liners. *Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa. Probl. Mechatronics. Armament Aviat. Saf. Eng.* 2024. Vol. 15, No. 1. P. 39–54. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4487>.
11. Liu Z., Lei Q., Xing S. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8, iss. 5. P. 3741–3751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034>.
12. Dong L. L., Ahangarkani M., Chen W. G., Zhang Y. S. Recent progress in development of tungsten-copper composites: fabrication, modification and applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018. Vol. 75. P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.03.014>.
13. Lambos N., Vosniakos G.-C., Papazetis G. Low-cost automatic identification of nozzle clogging in material extrusion 3D printers. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 51. P. 274–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.039>.

УДК 623.454.372:681.6

С. Л. Лігезін, Ph.D. мол. наук. співроб., С. О. Рябінін, Ph.D. ст. наук. співроб.,
О. Ю. Федоренко, д-р техн. наук, професор, В. О. Верещак, мол. наук. співроб.,
А. В. Захаров, канд. техн. наук, заст. зав. НДЧ, М. М. Будьонний, канд. техн. наук,
пров. інженер

УНІФІКОВАНИЙ УТИЛІЗАЦІЙНИЙ КУМУЛЯТИВНИЙ ЗАРЯД ДЛЯ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ

У роботі представлено комплексне дослідження перспектив застосування адитивних технологій і матеріалознавчих підходів для розробки малогабаритних утилізаційних засобів гуманітарного розмінування на базі композиційних філаментів із високим ступенем наповнення. Метою дослідження було оцінити матеріалознавчу обґрунтованість підходу й виявити ключові чинники, що визначають баланс між ефективністю дії, технологічністю виготовлення, мобільністю виробництва та екологічною прийнятністю. Аналітична частина включала огляд сучасних підходів до проектування складних геометрій ліжок і критеріїв відбору наповнювачів за техніко-економічними та екологічними показниками, а також обґрунтування критеріїв вибору матеріалів з урахуванням дисперсності наповнювача, адгезії до полімерної матриці та впливу на плинність розплаву. Емпірична частина була спрямована на порівняння матеріальних властивостей надрукованих зразків залежно від характеристик філаменту та якості його дисперсії, оцінку впливу складу матеріалу на механічні й експлуатаційні параметри та придатність до локалізованого виготовлення за ресурсних обмежень. Проведено якісний техно-економічний і стейкхолдерський аналіз, а також SWOT-аналіз, який виокремлює сильні сторони (локалізація виробництва, гнучкість дизайну, потенційно низька собівартість), слабкі сторони (взаємодія матеріал–матриця, питання довговічності), можливості масштабування і ключові ризики, пов'язані з експлуатацією, зберіганням та регуляторними й етичними обмеженнями. Окремо обговорено екологічні та етичні аспекти застосування біорозкладних матриць і шляхи мінімізації негативного впливу на довкілля. Висновки підтверджують перспективність поєднання адитивних процесів із цілеспрямованим матеріальним інжинірингом для створення адаптивних, мобільних і більш доступних рішень гуманітарного розмінування за умови подальшої технологічної оптимізації, комплексної оцінки безпеки та відповідності нормативам. Отримані результати можуть бути корисними для планування дослідницьких програм, технічної експертизи та політико-організаційних рішень у цій сфері.

Ключові слова: утилізаційний кумулятивний заряд, гуманітарне розмінування, контрольований підрип, технологія 3D-друку, високонаповнений філамент, дисперсність наповнювача, технологічні властивості композиту.

S. L. Lihezin, S. O. Riabinin, O. Yu. Fedorenko, V. O. Vereshchak, A. V. Zakharov,
M. M. Budonnyi

STANDARDIZED DISPOSAL SHAPED CHARGE FOR HUMANITARIAN DEMINING OF TERRITORIES

This paper presents a comprehensive study of the prospects for applying additive manufacturing technologies and materials-science approaches to the development of compact disposal devices for humanitarian demining, based on highly filled composite filaments. The aim of the study was to evaluate the materials-science justification for the approach and to identify the key factors that determine the balance between operational effectiveness, manufacturability, production mobility, and environmental acceptability. The analytical part included a review of current approaches to the design of complex nozzle geometries and criteria for selecting fillers according to techno-economic and environmental indicators, as well as the formulation of material selection criteria taking into account filler dispersion, matrix–filler adhesion, and effects on melt flow. The experimental part focused on comparing the material properties of printed samples depending on filament characteristics and dispersion quality of the filler, assessing the influence of material composition on mechanical and service properties, and evaluating suitability for localized manufacturing under resource-limited conditions. A qualitative techno-economic and stakeholder analysis, together with a SWOT assessment, highlights strengths (production localization, design flexibility, potentially low unit cost), weaknesses (material–matrix interaction, durability concerns), opportunities for scaling, and key risks related to operation, storage, and regulatory and ethical constraints. Environmental and ethical aspects of using biodegradable matrices and approaches to minimizing adverse environmental impact are discussed separately. The conclusions confirm the promise of combining additive processes with targeted materials engineering to create adaptive, mobile, and more accessible solutions for humanitarian demining, provided further technological optimization, comprehensive safety assessment, and regulatory compliance. The obtained results may be useful for planning research programs, technical evaluations, and policy-organizational decisions in this field.

Keywords: disposal shaped charge, humanitarian demining, controlled neutralization, 3D-printing technology, highly filled filament, filler dispersion, composite material properties.

О. М. Філенко, канд. техн. наук, доцент, Т. Б. Новожилова, доцент, В. Б. Байрачний, канд. техн. наук, професор, Т. С. Тихомирова, канд. техн. наук, доцент

ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ КУЛЬТУРИ У СТУДЕНТІВ ПРИ ДИСТАНЦІЙНОМУ ФОРМАТІ НАВЧАННЯ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: екологічна культура, екологічна освіта, екологічне виховання, сталий розвиток, дистанційне навчання.

Вступ. Одним з головних викликів, який постав перед вітчизняною вищою освітою при переході на дистанційний формат навчання, є відсутність можливості проведення практичних та лабораторних занять наживо. В цьому контексті найбільших т.з. «освітніх втрат» зазнають природничі науки – фізика, хімія, біологія, екологія. Не дивлячись на наявність чисельних стимуляційних середовища, відеоматеріалу, інтерактивних платформ, саме можливість власноруч здійснити експеримент формує у студентів не тільки дослідницькі навички, а й створює асоціативний ряд між теорією та практикою, який залишається назавжди.

Викладання екологічних дисциплін студентам не екологічних спеціальностей у вищих навчальних закладах спрямовано, насамперед, на формування у них світоглядного базису розуміння взаємопов'язаності всіх процесів та явищ, які протікають у навколишньому світі. У такий спосіб через засвоєння екологічних законів, постулатів та аксіом у студентів формується екологічна освіта, яка, за певних умов, може стати основою екологічної культури. На практиці це реалізується через викладання основ екології з представленням конкретних прикладів, розгляду ситуаційних кейсів, вирішення проблемних завдань, які мають відношення до основної спеціалізації студентів.

Формування екологічної культури впродовж всього життя є безумовним фактором розвитку суспільства. Автори [1] розкривають сутність поняття екологічної культури та звертають увагу на необхідність формування загального рівня екологічної культури населення для економічного добробуту країни. При цьому автори зазначають, що екологічна культура розкривається під час здійснення трудових функцій та в особистому житті, тобто у всіх аспектах життя людини. Автор [2] також наголошує на необхідності екологічній культурі молоді як запоруки безпечного розвитку суспільства. Автор [2] підкреслює, що формування екологічної культури починається з екологічної освіти. Автор [3] наголошує на екологічній культурі як невід'ємній частині полікультурної особистості здобувачів освіти, без якої не можливо говорити про цілісну підготовку фахівців.

Екологічна культура розглядається багатьма авторам як обов'язковий елемент сталого розвитку людства в цілому та окремих суспільств й країн [4–6]. При цьому всі автори розглядають формування екологічної культури під час освітньої діяльності заради сталого розвитку. Серед глобальних цілей сталого розвитку існує завдання 4.7 «До 2030 року забезпечити, щоб усі учні здобували знання і навички, необхідні для сприяння сталому розвитку, у т. ч. шляхом навчання з питань сталого розвитку та сталого способу життя, прав людини, гендерної рівності, пропаганди культури миру та ненасильство, громадянства світу й усвідомлення цінності культурного різноманіття і вкладу

культури в сталий розвиток», яке на національному рівні в окремі завдання не виділено, оскільки розглядається в рамках національної освітньої політики [7]. Проте, це не заважає дослідникам поєднувати та розглядати як цілісну систему екологічну культуру та освіту заради сталого розвитку.

Ризики, які супроводжують підготовку фахівців в сфері екології у повністю дистанційному форматі проаналізовані автором [8], при чому відзначено падіння рівня саме екологічної культури при дистанційному форматі. Переваги та недоліки дистанційного формату освіти в цілому розглядаються авторами у дослідженнях [9–12], серед основних недоліків наводяться падіння комунікативних навичок та соціальної функції навчання, а серед переваг – гнучкий графік навчання та використання сучасних мультимедійних технологій та інтерактивних онлайн платформ.

Метою даної роботи є розробка методики формування екологічної культури у студентів при дистанційному форматі навчання.

Обговорення результатів. При дистанційному форматі навчання реалізація експериментальних досліджень з метою формування екологічної культури можлива наступними методами та засобами:

1) використання онлайн платформ та онлайн ресурсів. Ці засоби доцільно використовувати для пошуку екологічної інформації, демонстрації інтерактивних мап забруднень, супутникових знімків поверхні Землі, відвідування онлайн тренінгів, перегляду документальних фільмів, оцінювання здобутих навичок через тестування чи вікторини;

2) проведення екологічних досліджень у місці свого фактичного проживання;

3) презентація результатів досліджень на конференціях, семінарах тощо.

Автори даної роботи розробили методику проведення екологічних досліджень у місці фактичного проживання студентів. Такі дослідження можна умовно поділити на дві великі групи:

а) опитування та спостереження, які будуть мати чіткий локальний характер;

б) практичне дослідження, тобто експеримент з визначення певних властивостей, характеристик об'єкту.

Для опитування можуть бути запропоновані теми, пов'язані з сортуванням твердих побутових відходів в громаді; переробкою та утилізацією твердих побутових відходів; станом зелених зон та оцінці потреби у створенні нових; ставленню громади до екологічних ініціатив підприємців; розумінню відповідальності за екологічну ситуацію у громаді кожного мешканця; поінформованість про небезпеку спалення опалого листя тощо. При здійсненні опитувань студенти самостійно розробляють анкету, формулюють питання та варіанти відповіді, спираючись на власний досвід участі в анкетуванні, отримані теоретичні знання та розуміючи локальні культурні та релігійні особливості місцевості. Обробляючи результати опитувань студенти не тільки узагальнюють відповіді, а й аналізують причини переважної більшості відповідей. У підсумку студенти збагачують свої екологічні знання та отримують нові дані для розвитку особистої та між особистої екологічної культури.

Спостереження та аналіз можуть стосуватися роботи місцевих підприємств з поводженням з відходами та озелененням; локальних сталих практик у всіх сферах життя та бізнесу; взаємодії людини та тварин, птахів у міському урбанізованому середовищі тощо. Студент самостійно обирає об'єкт спостереження та способи фіксації змін чи накопичення інформації, тривалість. У звіті надається як конкретна інформація щодо об'єкта спостереження, так й результати спостереження з висновками щодо впливу

об'єкта спостереження на поточну екологічну ситуацію у громаді та прогнозуванням впливу у перспективі. Спостереження у даному випадку є способом вивчення діяльності об'єкта та накопичення інформації, аналізуючи яку студент поповнює знання та практичні навички, що стають основою поведінкової, в тому числі екологічної, культури у майбутньому.

Практичні або дослідження при дистанційному форматі навчання реалізуються через реальні експерименти, які можна здійснити вдома.

Головними критеріями експерименту в домашніх умовах є безпечність, доступність та не високі матеріальні витрати (рис. 1).



Рисунок 1 – Головні вимоги до організації експериментів при дистанційному навчанні

Критерій безпечності означає відсутність роботи з відкритим джерелом тепла (вогнем), відсутність необхідності використання концентрованих кислот чи луг тощо.

Критерій щодо обладнання означає використання найбільш поширених приладів для вимірювання ваги, об'єму та маси, наприклад звичайних кухонних ваг та медичного шприцу для ін'єкції.

Під критерієм відтворюваності результатів мається на увазі можливість придбання здобувачами матеріалів, наприклад насіння, від одного й того ж саме постачальника. Це можливо реалізувати через адаптацію змісту домашнього експерименту під асортимент матеріалів, які наявні у всеукраїнських торговельних мережах.

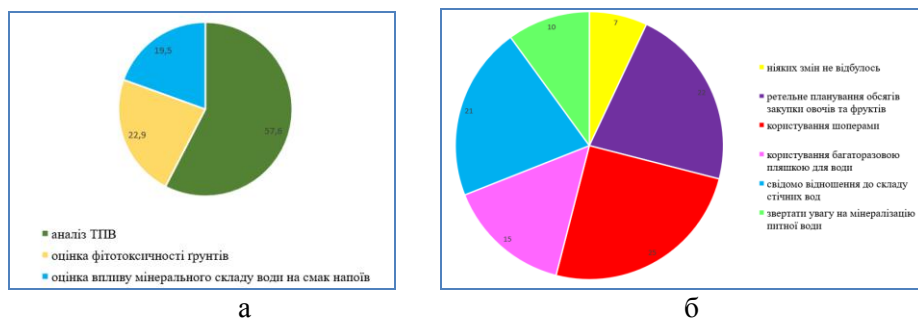
Суб'єктивне сприйняття здобувачем критерію цікавості може вплинути як на якість проведення експерименту, так й на взагалі проведення такого експерименту. Враховуючи студоцентричний підхід, який реалізується у закладах вищої освіти, зокрема в НТУ «ХПІ», необхідно формувати можливість вибору для здобувача щодо тематики експерименту при дистанційному навчанні.

Для формування екологічної культури автори пропонують та реалізують наступні види досліджень:

- 1) оцінка морфологічного складу твердого побутового сміття, яке утворюється у студента вдома;
- 2) оцінка фітотоксичності зразків ґрунту;
- 3) оцінка впливу мінерального складу води на органолептичні властивості напоїв.

Оцінка морфологічного складу твердого побутового сміття всім критеріям до домашнього експерименту, адже зваження відходів та фіксація типу відходів вимагає наявності тільки кухонних ваг та смартфона для створення фотозвіту. Це один з найбільш популярних серед здобувачів не екологічних спеціальностей домашніх експериментів під час вивчення таких дисциплін як «Екологія», «Промислова екологія», «Сталий розвиток країни» (рис. 2а). При цьому здобувачі відзначають, що до проведення експерименту не замислювались про склад своїх відходів та не фіксували, скільки

насправді вони викидають на смітник овочів та фруктів, полімерного пакування, тканинних відходів.



а – розподіл між домашніми експериментами, %; б – підвищення рівня екологічної культури здобувачів, %

Рисунок 2 – Підвищення екологічної культури здобувачів після реалізації домашніх експериментів при вивченні екологічних дисциплін, усереднені дані за 2023–2025 роки

25 % опитаних здобувачів після проведення такого експерименту відмовились від одноразових полімерних пакетів для покупок та придбали й користуються багаторазовими сумками-шоперами (рис. 2б); 22 % почали реально оцінювати необхідну кількість овочів, фруктів та зелені, необхідну у найближчий тиждень з метою зменшення частки такого типу відходів; 15 % здобувачів придбали багаторазову пляшку для води замість ПЕТ-пляшок з водою, які купували щоденно.

Оцінка фітотоксичності ґґґґґґ шляхом порівняння вегетативного розвитку рослин у зразках ґґґґґґ потребує від студентів більших зусиль, тому цей тип досліджень стоїть на другому місці (рис. 2а). За умовами експерименту здобувачі відбирали проби ґґґґґґ у різних точках свого населеного пункту, наприклад біля АЗС та СТО, на дитячих майданчиках, у парках, понад автомагістралями, на власних присадибних ділянках. З мою відтворюваності результатів експерименту в якості посадкового матеріалу здобувачі однієї групи обирали насіння салату зазначеного виробника. Також за умовами експерименту здобувачі могли самостійно змодельовати забруднений ґґґґґґ, додаючи до якісних субстратів мастила, відпрацьовані елементи живлення (батареї), побутову хімію тощо.

Після опрацювання результатів дослідження, 21 % здобувачів, які періодично або постійно мешкають у приватному секторі, почали слідкувати, які сам небезпечні компоненти з побутової хімії потрапляють до стічних вод та поступово почали користуватися органічними миючими засобами.

Для проведення експерименту з оцінки впливу мінералізації води на смак напоїв, здобувачі однієї групи повинні були придбати пляшковану воду різних ТМ, взяти проби води з-під крану в їх населеному пункті, з природнього джерела питної води та з водойми типу річка, озеро ставок (за наявності); домовитись та придбати пакований чай визначеного виробника. Такий експеримент формує у здобувачів розуміння зв'язку між смаковими якостями напоїв та хімічним складом води, який суттєво залежить у джерельній воді від екологічної ситуації в громаді. Таким чином теоретичні знання про небезпеку забруднення джерел прісної води отримали практичне підтвердження.

Після проведення експерименту 18 % здобувачів (рис. 2а) почали звертати увагу на мінеральний склад питної води та відповідально ставитися до споживання води з відкритих джерел.

Висновки. Формування екологічної культури населення – складний, але необхідний для сучасного суспільства процес. Цей процес є безперервним та характерен для людини впродовж всього життя. Підвищення рівня екологічної культури можливо через реалізацію культурної та світоглядної функції екологічної освіти та освіти задля сталого розвитку. Власно концепція сталого розвитку базується на визначеному, високому рівні екологічної культури та екологічної свідомості населення як базису сталого розвитку окремої країни чи соціальної групи. Головними центрами формування екологічної культури у сучасному світі виступають заклади освіти, починаючи від дитячого садочка до вищих навчальних закладів.

При дистанційному форматі навчання для екологічних спеціальностей необхідно адаптувати експериментальні дослідження під умови їх реалізації в домашніх умовах. Результати опитування здобувачів, представлені у даній роботі, свідчать про реальне підвищення рівня їх екологічної культури саме після здійснення описаних експериментів з оцінки морфологічного складу твердого побутового сміття, оцінки фітотоксичності зразків ґрунту; оцінки впливу мінерального складу води на органолептичні властивості напоїв.

Таким чином, адаптація існуючих та пошук нових типів експериментальних досліджень при вивченні екології при дистанційному форматі навчання є важливим з точки зору формування та підвищення рівня екологічної освіти.

Література

1. Гаращук О., Куценко В., Кудерова А. Екологічна культура як складова сучасного соціально-економічного розвитку та проблеми її формування в суспільній свідомості. *Вісник Економіки*. 2025. № 2. С. 60–71. URL: <https://visnykj.wunu.edu.ua/index.php/visnykj/article/view/1770/1862>.
2. Кузьмич Д. Екологічна культура молоді як важливий чинник безпечного розвитку суспільства майбутнього. *Молодь і ринок*. 2024. № 3. С. 146–151.
3. Толочко С. В. Екологічна культура в структурі полікультурної особистості здобувачів освіти. *Суспільство та національні інтереси*. 2024. № 4. С. 670–683.
4. Маленко Я. Екологічна культура – адаптивний механізм розвитку екологічної метасистеми. *Theoretical and practical aspects of modern scientific research*. II International Scientific and Practical Conference, April 28, 2023; Seoul, South Korea. 2023. P.189–191.
5. Совгіра С. Екологічна культура в аспекті освіти для сталого розвитку суспільства. *Збірник наукових праць Уманського державного педагогічного університету*. 2023. № 2. С. 17–24.
6. Совгіра С., Браславська О. Освіта для сталого розвитку як основа формування екологічної культури майбутніх фахівців. *Збірник наукових праць Уманського державного педагогічного університету*. 2023. № 4. С. 13–23. DOI: <https://doi.org/10.31499/2307-4906.4.2022.269289>.
7. Національна доповідь «Цілі сталого розвитку: Україна». Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf>.
8. Белан В. Ю. Використання технологій змішаного навчання для підготовки студентів екологічних спеціальностей на прикладі Національного транспортного університету. *Екологічна безпека та раціональне природокористування*. Матеріали Всеукраїнської наукової конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених, 14 листопада 2024 р. Житомир. Житомирська політехніка. 2024. С. 275–278.

9. Мала І. Дистанційне навчання як дієвий інструмент управлінської освіти. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2022. № 2(66). С. 132–151. DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2022-66-132-151>.

10. Лимар Л. Основні переваги та недоліки дистанційного навчання іноземних мов у немовному закладі вищої освіти. *Український педагогічний журнал*. 2022. № 1. С. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.32405/2411-1317-2022-1-24-29>.

11. Ілляшенко С. М., Шипуліна Ю. С., Семенютін А. О. Проблеми та перспективи дистанційного навчання в умовах повоєнного відновлення і технологічних трансформацій економіки України. *Бізнес Інформ*. 2024. № 4. С. 79–88. URL: https://www.business-inform.net/article/?year=2024&abstract=2024_4_0_79_88.

12. Тихомирова Т. С., Шестопалов О. В., Новожилова Т. Б., Босюк А. С., Чікірякін К. В. Використання інструментів "Kahoot!" в освітній діяльності для формування екологічної культури та екологічної свідомості молоді. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. № 1. С. 119–129.

Bibliography (transliterated)

1. Harashchuk O., Kutsenko V., Kudierova A. Ekolohichna kultura yak skladova suchasnoho sotsialno-ekonomichnoho rozvytku ta problemy yii formuvannia v suspilnii svidomosti. *Visnyk Ekonomiky*. 2025. No. 2. P. 60–71. URL: <https://visnykj.wunu.edu.ua/index.php/visnykj/article/view/1770/1862>.

2. Kuzmych D. Ekolohichna kultura molodi yak vazhlyvyi chynnnyk bezpechnoho rozvytku suspilstva maibutnoho. *Molod i rynek*. 2024. No. 3. P. 146–151.

3. Tolochko S. V. Ekolohichna kultura v strukturi polikulturnoi osobystosti zdobuvachiv osvity. *Suspilstvo ta natsionalni interesy*. 2024. No. 4. P. 670–683.

4. Malenko Ya. Ekolohichna kultura – adaptyvnyi mekhanizm rozvytku eko-lohichnoi metasystemy. *Theoretical and practical aspects of modern scientific research*. II International Scientific and Practical Conference, April 28, 2023; Seoul, South Korea. 2023. P.189–191.

5. Sovhira S. Ekolohichna kultura v aspekti osvity dlia staloho rozvytku suspilstva. *Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu*. 2023. No. 2. P. 17–24.

6. Sovhira S., Braslavskaya O. Osvita dlia staloho rozvytku yak osnova formuvannia ekolohichnoi kultury maibutnikh fakhivtsiv. *Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu*. 2023. No. 4. P. 13–23. DOI: <https://doi.org/10.31499/2307-4906.4.2022.269289>.

7. Natsionalna dopovid «Tsili staloho rozvytku: Ukraina». Ministerstvo ekonomichnoho rozvytku i torhivli Ukrainy. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf>.

8. Belan V. Yu. Vykorystannia tekhnolohii zmishanoho navchannia dlia pidhotovky studentiv ekolohichnykh spetsialnostei na prykladi Natsionalnoho transportnoho universytetu. *Ekolohichna bezpeka ta ratsionalne pryrodokorystuvannia*. Materialy Vseukrainskoi naukovoï konferentsii zdobuvachiv vyshchoï osvity ta molodykh uchenykh, 14 lystopada 2024 r. Zhytomyr. Zhytomyrska politekhnika. 2024. P. 275–278.

9. Mala I. Dystantsiine navchannia yak diievyi instrument upravlinskoï osvity. *Vcheni zapysky Universytetu «KROK»*. 2022. No. 2(66). P. 132–151. DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2022-66-132-151>.

10. Lymar L. Osnovni perevahy ta nedoliky dystantsiinoho navchannia inozemnykh mov u nemovnomu zakladi vyshchoi osvity. *Ukrainskyi pedahohichnyi zhurnal*. 2022. No. 1. P. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.32405/2411-1317-2022-1-24-29>.

11. Illiashenko S. M., Shypulina Yu. S., Semeniutin A. O. Problemy ta per-spektyvy dystantsiinoho navchannia v umovakh povoiennoho vidnovlennia i tekhnolohichnykh transformatsii ekonomiky Ukrainy. *Biznes Inform.* 2024. No. 4. P. 79–88. URL: https://www.business-inform.net/article/?year=2024&abstract=2024_4_0_79_88.

12. Tykhomyrova T. S., Shestopalov O. V., Novozhylova T. B., Bosiuk A. S., Chikiriakin K. V. Vykorystannia instrumentiv "Kahoot!" v osvithnii diialnosti dlia formuvannia ekolohichnoi kultury ta ekolohichnoi svidomosti molodi. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2025. No. 1. P. 119–129.

УДК 378.1:504.3

О. М. Філенко, канд. техн. наук, доцент, Т. Б. Новожилова, доцент, В. Б. Байрачний, канд. техн. наук, професор, Т. С. Тихомирова, канд. техн. наук, доцент

ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ КУЛЬТУРИ У СТУДЕНТІВ ПРИ ДИСТАНЦІЙНОМУ ФОРМАТІ НАВЧАННЯ

Викладання екологічних дисциплін студентам не екологічних спеціальностей у вищих навчальних закладах спрямовано, в першу чергу, на формування у них світоглядного базису розуміння взаємопов'язаності всіх процесів та явищ, які протікають у на-вколишньому світі. Таким чином через засвоєння екологічних законів, постулатів та аксіом у студентів формується екологічна освіта, яка, за певних умов, може стати основою екологічної культури. На практиці це реалізується через викладання основ екології з представленням конкретних прикладів, розгляду ситуаційних кейсів, вирішення проблемних завдань, які мають відношення до основної спеціалізації студентів.

Дистанційний формат навчання поставив перед сучасною природничою освітою багато викликів, серед яких головним можна вважати необхідність зберегти експериментальні дослідження, які здобувачі проводять самостійно, за межами навчальних закладів.

Метою даної роботи є розробка методики формування екологічної культури у студентів при дистанційному форматі навчання.

З метою підвищення рівня екологічної культури здобувачів при вивченні екологічних дисциплін запропоновано реалізовувати три типи експериментів в домашніх умовах: з оцінки морфологічного складу твердого побутового сміття, оцінки фітотоксичності зразків ґрунту; оцінки впливу мінерального складу води на органолептичні властивості напоїв.

Дані експерименти відповідають критеріям безпечності, відтворюваності результатів, простоті реалізації та доступності необхідних матеріалів.

25 % опитаних здобувачів після проведення експерименту з оцінки морфологічного складу твердого побутового сміття відмовились від одноразових полімерних пакетів для покупок та придбали й користуються багаторазовими сумками-шоперами; 22 % почали реально оцінювати необхідну кількість овочів, фруктів та зелені, необхідну у найближчий тиждень з метою зменшення частки такого типу відходів; 15 % здобувачів придбали багаторазову пляшку для води замість ПЕТ-пляшок з водою, які купували щоденно; 21 % здобувачів, які періодично або постійно мешкають у приват-

ному секторі, почали слідкувати, які сам небезпечні компоненти з побутової хімії потрапляють до стічних вод та поступово почали користуватися органічними миючими засобами. Отримані дані свідчать про підвищення рівня екологічної культури саме після реалізації домашніх експериментів при вивченні екологічних дисциплін при дистанційному форматі навчання.

Ключові слова: екологічна культура, екологічна освіта, екологічне виховання, сталий розвиток, дистанційне навчання.

O. M. Filenko, T. B. Novozhylova, V. B. Bairachnyi, T. S. Tykhomirova

FORMATION OF ENVIRONMENTAL CULTURE IN STUDENTS IN DISTANCE LEARNING FORMAT

Teaching environmental disciplines to students of non-environmental specialties in higher education institutions is aimed, first of all, at forming in them a worldview basis for understanding the interconnectedness of all processes and phenomena occurring in the world around them. Thus, through the assimilation of environmental laws, postulates and axioms, students form an environmental education, which, under certain conditions, can become the basis of an environmental culture. In practice, this is implemented through teaching the basics of ecology with the presentation of specific examples, consideration of situational cases, and solving problem tasks related to the main specialization of students.

The distance learning format has posed many challenges to modern natural science education, among which the main one can be considered the need to preserve experimental research that applicants conduct independently, outside of educational institutions.

The aim of this work is to develop a methodology for the formation of environmental culture in students in a distance learning format.

In order to increase the environmental culture level of applicants when studying environmental disciplines, it is proposed to implement three types of experiments at home: to assess the morphological composition of solid household waste, to assess the phytotoxicity of soil samples; to assess the water mineral composition impact on the organoleptic properties of beverages.

These experiments meet the safety criteria, results reproducibility criteria, ease of implementation and availability of necessary materials.

25 % of the surveyed applicants, after conducting an experiment on assessing the morphological composition of solid household waste, refused disposable plastic bags for shopping and purchased and use reusable shopping bags; 22 % began to realistically estimate the required amount of vegetables, fruits and greens needed in the coming week in order to reduce the share of this type of waste; 15 % of applicants purchased a reusable water bottle instead of PET water bottles that they bought daily; 21 % of applicants who periodically or permanently live in the private sector began to monitor which hazardous components of household chemicals get into wastewater and gradually began to use organic detergents. The data obtained indicate an increase in the level of environmental culture precisely after the implementation of home experiments when studying environmental disciplines in the distance learning format.

Keywords: environmental culture, environmental education, environmental upbringing, sustainable development, distance learning.

М. С. Кочетов, аспірант, Г. М. Черкашина, канд. техн. наук, доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ БІОПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО БІОПЛАСТИКУ ТА ВІДПРАЦЬОВАНОЇ КАВОВОЇ ГУЩІ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: екологія, безпека, біополімери, композити, термопластичність, кавава гуща.

Вступ. Пластмаси поширені в сучасному житті завдяки своїм чудовим механічним, тепловим та хімічним властивостям у поєднанні з низькою вартістю та простотою виробництва [1]. Протягом останніх десятиліть використання пластмас зросло в геометричній прогресії, що зумовлено попитом у широкому спектрі галузей промисловості, включаючи упаковку, автомобільну промисловість, будівництво та охорону здоров'я. Однак це швидке зростання призвело до значних екологічних проблем, включаючи сильну залежність від викопних ресурсів, внесок у зміну клімату через викиди парникових газів, та повсюдне забруднення навколишнього середовища небіодеградабельними пластиковими відходами [2]. Ці проблеми прискорили розробку альтернативних матеріалів, зокрема біологічних та біодеградабельних полімерів, таких як полімолочна кислота (ПЛА) [3], полібутиленсукцинати (ПБС), полібутиленадіпатефталати (ПБАТ) та полігідроксиалканоати (ПГА), які призначені для заміни традиційних пластмас на основі викопного палива [4,5]. Незважаючи на ці досягнення, частка біопластиків на світовому ринку залишається дуже малою порівняно з пластиками на основі нафти. Основним обмеженням є те, що біопластикам часто бракує механічних та фізичних характеристик, необхідних для багатьох вимогливих застосувань, що обмежує їхню конкурентоспроможність. Крім того, їх виробничі витрати значно вищі, що обмежує їх використання, особливо для низьковитратних застосувань з великим обсягом виробництва, таких як упаковка харчових продуктів [6]. Вирішення цих проблем має вирішальне значення для ширшого впровадження біопластиків.

Одним із можливих напрямів отримання екологічно безпечних біодеградабельних матеріалів є модифікація традиційних полімерів. Поєднання синтетичного полімеру з природними органічними наповнювачами (наприклад, крохмалем, рисовою лузгою, деревним борошном) або відходами споживання може надавати матеріалу новий набір властивостей, зокрема підвищену здатність до швидкої біодеградації [7]. Водночас харчова промисловість генерує величезну кількість сільськогосподарських та промислових побічних відходів, таких як пшеничні висівки, дробина, корінці ячменю, ріпакова макуха, сироватка, виноградні вичавки, жом цукрового буряка, фінікові вичавки, кавава срібна шкірка, кавава гуща та лушпиння какао-бобів. Серед них кавава гуща (КГ), побічний продукт процесу варіння кави, привернула значну увагу як універсальний та екологічний матеріал. У контексті полімерної науки, лігноцелюлозний склад КГ, багатий на целюлозу, геміцелюлозу, лігнін, білки та ліпіди, робить його перспективним кандидатом для підвищення продуктивності та стійкості біополімерних композитів. Попередні дослідження продемонстрували інтеграцію КГ у різні біополімери, такі як ПЛА [8], суміші ПЛА/полігідроксибутирату (ПГБ) [9], полібутиленсукцинат (ПБС), та

ПБАТ, з різним впливом на фізичні, механічні та теплові властивості отриманих композитів. Наприклад, Бомфін та ін. виявили, що включення 10–30 мас.% КГ до ПЛА змінює кристалічність, знижує температуру склування та підвищує в'язкість при помірних рівнях наповнювача, хоча вищий вміст призводить до збільшення пористості та зниження густини [8]. Гайдукова та ін. повідомили, що додавання 20–60 мас.% КГ до ПБС збільшує жорсткість та мікротвердість, але знижує міцність на розрив та видовження при розриві зі збільшенням вмісту наповнювача [9]. Термічна стабільність знижується зі збільшенням завантаження КГ, тоді як кристалічність залишається стабільно високою (≥ 60 %). Аналогічно, Мустафа та ін. спостерігали, що включення КГ до ПБАТ знижує міцність на розтяг та пластичність, але покращує жорсткість, при цьому біокомпозити демонструють добру дисперсію та підвищену гідрофільність поверхні завдяки наявності гідрофільного лігноцелюлозного наповнювача [10]. Ці дослідження підкреслюють, що КГ може служити функціональним наповнювачем у біопластиках, але також показують, що властивості композитів значною мірою залежать від типу матриці, завантаження наповнювача та міжфазної сумісності. Хоча є кілька досліджень досліджували включення КГ до біополімерів [11,12], вплив фізико-хімічних КГ на взаємозв'язок структура-властивість біокомпозитів залишається недостатньо вивченим, що обмежує оптимізацію їх механічних та фізичних характеристик.

Актуальність представленої роботи обумовлена необхідністю пошуку шляхів створення міцних та еластичних біодеградабельних екологічно безпечних композицій на основі біополімерних пластиків з відходами КГ

Мета статті – дослідження екологічно безпечних біополімерних композитів на основі термопластичного біопластику та відпрацьованої кавової гущі.

Матеріали та методи. Об'єктами експериментального дослідження були:

- волога КГ з сортів Робусти та Арабіки у співвідношенні 50:50 мас. %, зібрані в 8 різних кав'ярнях «Аромакава» міста Харкова;

- термопластичний біопластик марки GEMABIO F (Gema Polimer Plastik Ürünleri San. ve Tic. A.S., Турція) на основі ПБАТ, який містить відновлювану сировину і має до 90 % вмісту вуглецю біопоходження. Вироби з GEMABIO повністю біодеградабельні та компостуються залежно від товщини виробу. Густина біопластику складає $1,379 \text{ г/см}^3$ з індексом плинності розтопу (MFI) 2–4 г/10 хв (190°C , 2,16 кг).

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.

Екологічно безпечні біодеградабельні композити одержували експериментально методом екструдювання попередньо підготовлених гранул GEMABIO F 2910* та КГ в одношнековому лабораторному екструдері при температурі $160\text{--}170^\circ\text{C}$ і швидкості обертання валка 30–100 об/хв. Співвідношення L/D екструдера становить 25 для підвищення однорідності розподілу КГ у готових екологічно безпечних біодеградабельних композитах.

Основні хімічні групи в екологічно безпечних біодеградабельних композитах визначено за смугами поглинання ІЧ-спектрів, які знімали на ІЧ-спектрофотометрі «Nicolet 380» (США), оснащеного блоком ослабленого повного відбиття (ATR). Кожен зразок сканували двадцять разів у діапазоні хвильових чисел $600\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ з роздільною здатністю 4 см^{-1} . Для визначення основних технологічних характеристик екологічно безпечних біодеградабельних композитів використано гідростатичний метод згідно

ISO 1183-1 для вимірювання густини зразка полімеру об'ємом не менше 1 см^3 , показник плинності розтопу (ППР) згідно ISO 1133 за допомогою приладу ПРТ-М при 190°C та навантаженні 2,16 кгс та температурний інтервал топлення згідно ISO 3146 на лабораторному латунному диску розміром діаметр 50 мм товщина 19 мм з боковим отвором під термометр діаметром 9 мм.

Результати. Була початку досліджень за для уникнення проблеми спучування через великий вміст води була проведена підготовка КГ для вводу в склад термопластичного біопластику марки GEMABIO F. КГ просушено в сушильній шафі впродовж 4 годин при температурі 70°C з перемішуванням кожні 30–40 хвилин, після чого температуру в сушильній шафі було підвищено до 105°C та просушено ще 20–30 хвилин для максимального видалення води з КГ. Після етапу просушування КГ представляла собою матеріал у вигляді різного розміру агломератів, які утворилися під час сушіння в процесі нагріву, через виділення маслянистих речовин які мають підвищену адгезію та взаємодіють між собою. Агломерати КГ розтовкли у керамічній ступі до однорідної дисперсної суміші. Було досліджено гранулометричний склад КГ. Для цього КГ просівали через розміри сит 400, 200 та 100 мкм. Частки КГ, затримані на ситі 400 мкм складала біля 9,8 % мас., а частки КГ, затримані на ситі 200 мкм 81 % мас, а затримані на ситі 100 мкм – 9,2 % мас. Фактично, для дослідженої КГ характерне унімодальність гранулометричного складу з максимум при 200 мкм. Одержані мікрофотографії КГ різних фракцій представлено на рис. 1.



Рисунок 1 – Мікрофотографії частинок КГ

А – фракція більша за 400 мкм, В – фракція 200 менша за 200 мкм

З результатів морфологічних досліджень, представлених на рис. 2, видно, що КГ характеризуються пластинчастою структурою частинок. Частинки усіх фракцій КГ, вкриті смоляними або маслянистими речовинами, про що свідчить помітний блиск на мікрофотографіях.

Для дослідження сумісності КГ та термопластичного біопластику марки GEMABIO F проведено потенціометричний аналіз їх поверхні. Обрано рН-метричний метод визначення рівня рН водних суспензій pH_0 (табл. 1). У водних суспензіях потенціометричним методом досліджувалась зміна рН з часом $pH_{\text{пт}}$ та розраховувались рН у рівноважному стані $pH_{\text{суп.}}^p$ – рис. 3 та табл. 1. В ході дослідження експериментально визначено, що поверхня термопластичного біопластику марки GEMABIO F має характер близький до нейтрального з слабо-основною силою активних центрів $pKa \approx 7,08\text{--}7,35$,

поверхня КГ має характер також близький до нейтрального з слабо-кислотною силою активних центрів $pK_a \approx 6,30 - 6,47$.

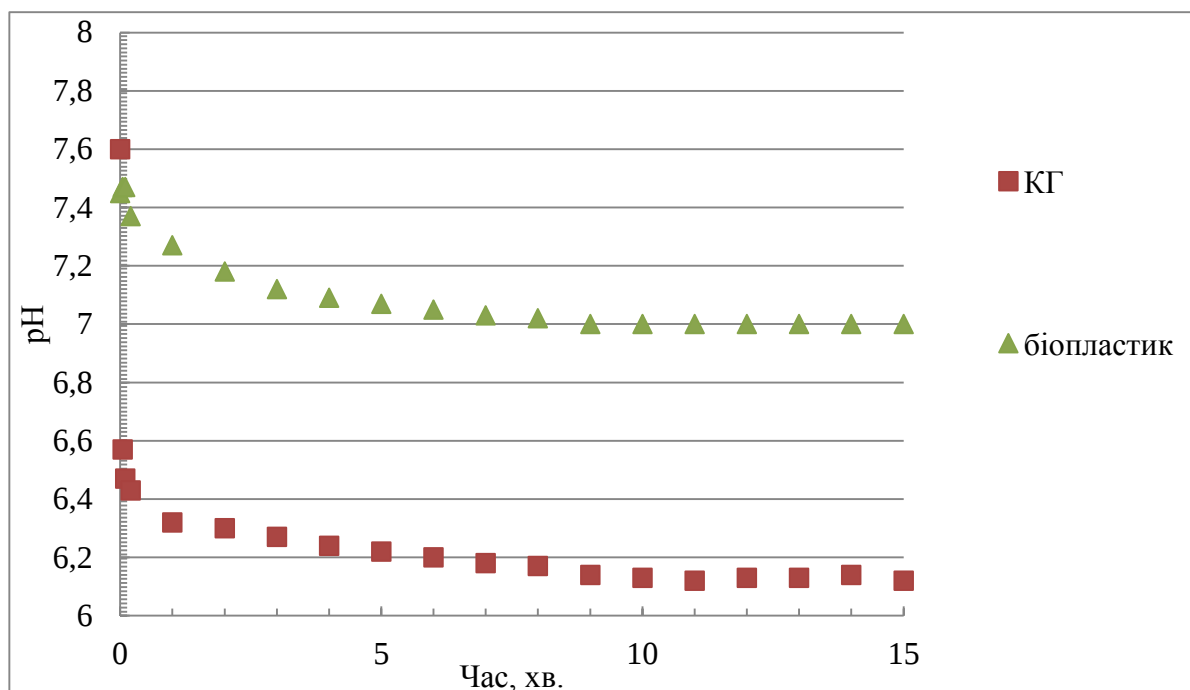


Рисунок 2 – Результати дослідження кислотно-основних поверхневих властивостей КГ та термопластичного біопластику марки GEMABIO F

Таблиця 1 – Результати експериментального визначення інтегральної (загальної) кислотності поверхні КГ та термопластичного біопластику марки GEMABIO F

Матеріал	pH_0	$pH_{\text{суп.}}^p$	$pH_{\text{ПТ}}$	Час встановлення рівноважного стану, с
Термопластичний біопластик марки GEMABIO F	7,43	7,08	7,35	245
Кавова гуща	7,59	6,30	6,47	58

Показано, що поверхня термопластичного біопластику марки GEMABIO F має характер близький до нейтрального зі слабо-основною силою активних центрів $pK_a \approx 7,08 - 7,36$, поверхня кавової гущі має характер також близький до нейтрального зі слабо-кислотною силою активних центрів $pK_a \approx 6,30 - 6,47$.

Спектр FTIR КГ, показаний на рис. 5, демонструє широкий та складний діапазон смуг поглинання, що відповідають гетерогенному біохімічному складу матеріалу. Широка смуга з центром при 3336 см^{-1} пояснюється валентними коливаннями О–Н від між- та внутрішньомолекулярних водневих зв'язків, головним чином пов'язаних з полісахаридами, такими як целюлоза та геміцелюлоза, а також фенольними гідроксильними групами в лігніні.

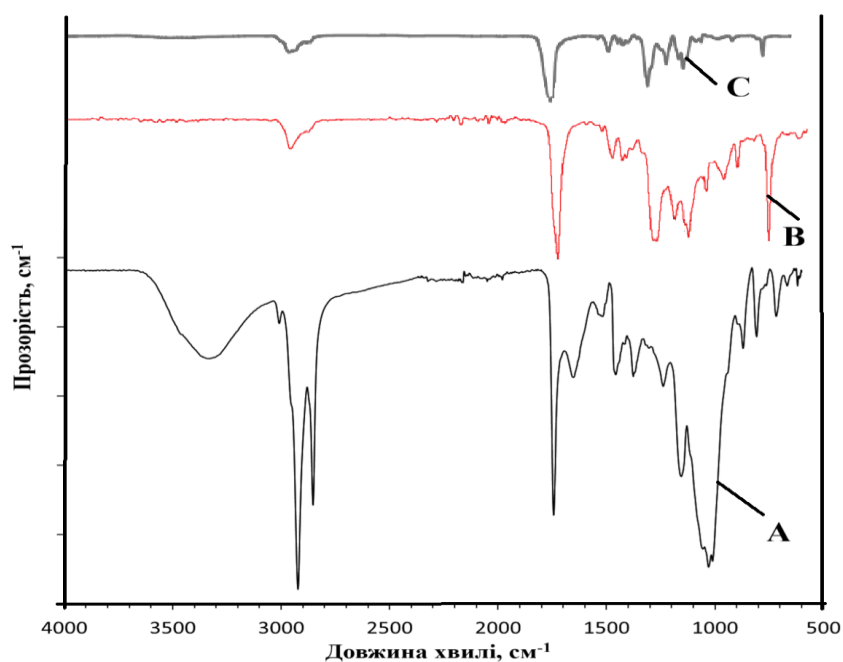


Рисунок 3 – Спектри ATR-FTIR:

А – висушеної кавової гущі КГ, В – термопластичний біопластик марки GEMABIO F,
С – екологічно безпечних біодеградабельних композитів з вмістом 40 % мас. КГ

Слабка смуга при 3010 cm^{-1} пов'язана з розтягом С–Н у цис-конфігурованих подвійних зв'язках (С–С), що зустрічаються в ненасичених жирних кислотах, таких як лінолева та олеїнова кислоти, присутніх в КГ. Поглинання при 2923 cm^{-1} та 2854 cm^{-1} відповідає валентним коливанням зв'язків С–Н в аліфатичних групах CH_2 , які характерні для структур жирних кислот. Чітко виражений пік поглинання при 1744 cm^{-1} характерний для валентних коливань карбонільного С–О від етерних груп, зазвичай пов'язаних з ліпідними компонентами та іншими структурами на основі вуглеводнів. Поглинання при 1649 cm^{-1} пояснюється валентними коливаннями С–С цис-олефінів (цис- RHC CHR) і також може відповідати валентним коливанням С–Н амідів І, характерним для білкових структур. Поглинання при 1456 cm^{-1} пов'язане з деформаційними коливаннями С–Н в аліфатичних групах CH_2 та CH_3 , тоді як смуга при 1377 cm^{-1} відповідає симетричному деформаційному коливанню С–Н в групах CH_2 , яке зазвичай приписується компонентам кавової олії. Смуга поглинання при 1240 cm^{-1} пов'язана зі зв'язками С–О–С у целюлозі та може також включати валентні коливання С–О з функціональної групи О–С–О у геміцелюлозах. Смуга при 1029 cm^{-1} виникає внаслідок валентних коливань С–О та С–С, а також коливань $\text{C}_6\text{H}_2\text{O}_6$, характерних для целюлозних структур. Поглинання при 808 cm^{-1} свідчить про наявність ізомерів хлорогенової кислоти, а також деформаційного коливання С1–Н в арабінах та арабіногалактанах у матриці геміцелюлози. Сигнал при 718 cm^{-1} є результатом перекриття аліфатичних коливань CH_2 та позаплощинних деформацій цис-дизаміщених олефінів, які зазвичай зустрічаються в компонентах кавової олії. Загалом, дані ІЧ-спектроскопії з Фур'є підтверджують наявність кількох функціональних груп, включаючи гідроксильні, карбонільні та ефірні зв'язки, які відображають вміст целюлози, геміцелюлози, лігніну, жиру та білка у відпрацьованій кавовій гущі. Важливо зазначити, що склад сушеної КГ піддається природній мінливості через відмінності в походженні кави, типі зерен, рівні обсмажування та умовах заварювання.

Така мінливість може впливати на відносну кількість лігноцелюлозних та ліпідних компонентів, потенційно впливаючи на взаємодію наповнювач-матриця, термічну стабільність та поглинання вологи. Хоча в нашому дослідженні використовувалася одна промислово виготовлена партія КГ для забезпечення експериментальної узгодженості, майбутні дослідження можуть розглянути питання про те, як походження та обробка кави впливають на характеристики та відтворюваність композиту. ІЧ спектри КГ та термопластичного біопластику марки GEMABIO F показують функціональні групи, пов'язані з обома матеріалами. КГ вносить піки від гідроксильних О-Н та С-Н зв'язків в області 2800–3600 cm^{-1} , а етерні групи (від залишкових олій) близько 1740 cm^{-1} . Для термопластичного біопластику марки GEMABIO F характерні піки, такі як етерні зв'язки С-О та ароматичні С-Н валентні зв'язки. У екологічно безпечних біодеградабельних композитах з вмістом 40 % мас. КГ ці піки видимі, причому інтенсивність піків, пов'язаних з КГ, зростає з кількістю використаної КГ. Фактично ІЧ-спектр екологічно безпечних біодеградабельних композитів показують комбінацію піків обох компонентів.

Було досліджено оптимізовані склади екологічно безпечних біодеградабельних композитів: термопластичний біопластик марки GEMABIO F - КГ у наступних співвідношеннях, % мас.:

- 60 % мас. термопластичний біопластик марки GEMABIO F та 40 % мас. КГ – БПК1;
- 40 % мас. термопластичний біопластик марки GEMABIO F та 60 % мас. КГ – БПК2;
- 20 % мас. термопластичний біопластик марки GEMABIO F та 80 % мас. КГ – БПК3.

При поєднанні компоненти ретельно перемішувалися та перед загрузкою до бункера лабораторного екструдера. Технологічно екологічно безпечні біодеградабельні композити перероблялися без особливостей за винятком фази завантаження, яка відбувалася порційно, аби не було зсипання дрібної фракції КГ в зону загрузки екструдера та розділення суміші – термопластичний біопластик марки GEMABIO F та КГ під впливом вібрацій, які утворюються під час роботи екструдера та діють на його бункер. Зі знімків можна визначити здатність наповнювача розподілятися в полімерній матриці по зовнішньому вигляду поверхні зразків. У складі екологічно безпечних біодеградабельних композитів БПК1 привалює полімерна матриця. На поверхні зразка БПК1 візуально виділяється невелика кількість чорних краплень КГ, це вказує на те, що наповнювач добре диспергувався в полімерній матриці та його кількість можна збільшити. Зі збільшенням кількості КГ до 60 % мас. спостерігається зміння зовнішнього вигляду екологічно безпечних біодеградабельних композитів зі зміною кольору з сірого на темно-коричневий та збільшення дисперсної фази КГ на поверхні зразка. За візуальними спостереженнями можна визначити перехід від середньонаповненого екологічно безпечного біодеградабельного композиту БПК1 до високонаповненого екологічно безпечного біодеградабельного композиту БПК2.

У результаті дослідження впливу вмісту КГ на комплекс технологічних характеристик екологічно безпечних біодеградабельних композитів відбувається зниження ПТР і густини та підвищення температури топлення при збільшенні вмісту КГ – таблиця 2.

Дійсно, модифікація термопластичного біопластику марки GEMABIO F КГ дозволяє підвищити комплекс його технологічних характеристик та здатність до переробки традиційними методами для термопластів: екструзія, лиття під тиском тощо. Це до-

звояє рекомендувати їх для переробки на вироби для пакування та тари харчових та нехарчових продуктів: лотки, бокси, стакани, контейнери та т.п.

Таблиця 2 – Впливу вмісту КГ на комплекс технологічних характеристик екологічно безпечних біодеградабельних композитів

Композит	Міцносні показники	
БПК1	ППР, г/10 хв.	3,5±0,1
	Густина, г/см ³	1,341±0,1
	Температура топлення, °C	150±0,1
БПК2	ППР, г/10 хв.	2,5±0,1
	Густина, г/см ³	1,309±0,1
	Температура топлення, °C	160±0,1
БПК3	ППР, г/10 хв.	2,1±0,1
	Густина, г/см ³	1,259±0,1
	Температура топлення, °C	165±0,1

Висновки. В огляді 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 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.

Література

1. Lebreton L., Andrady A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*. 2019. Vol. 5. No. 1. P. 1–11.
2. Houssini K., Li J., Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6. No. 1. P. 257.
3. Tilsted J. P. Ending fossil-based growth: confronting the political economy of petrochemical plastics. *One Earth*. 2023. Vol. 6. No. 6. P. 607–619.
4. Shen M. (Micro) plastic crisis: un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 254. P. 120138.

5. Zhao X., Cornish K., Vodovotz Y. Narrowing the gap for bioplastic use in food packaging: an update. *Environmental science & technology*. 2020. Vol. 54. No. 8. P. 4712–4732.
6. Supri S., Felicia W. X. L., Affandy M. A. M., Padam B. S., Prihanto A. A., Rovina K. Macroalgae-Based Bio-Based Packaging: characteristics, green extraction methods, and applications as sustainable solutions. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. 2025. Vol. 15. No.1. P. 249–266.
7. Samir A., Ashour F. H., Hakim A., Bassyouni M. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *Npj Materials Degradation*. 2022. Vol. 6. No. 1.
8. de Bomfim A. S. C. et al. Effect of spent coffee grounds on the crystallinity and viscoelastic behavior of polylactic acid composites. *Polymers*. 2023. Vol. 15. No. 12. P. 2719.
9. Boey J. Y. et al. The effect of spent coffee ground (SCG) loading, matrix ratio and biological treatment of SCG on poly (hydroxybutyrate)(PHB)/poly (lactic acid)(PLA) polymer blend. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 266. P. 131079.
10. Gaidukova G., Platnieks O., Aunins A., Barkane A., Ingrao C., Gaidukovs S. Spent coffee waste as a renewable source for the production of sustainable poly(butylene succinate) biocomposites from a circular economy perspective. *RSC Advances*. 2021. Vol. 11. P. 18580.
11. Tang L., Hou X., Wang J., Pan L. Effect of different chemical surface treatments on interfacial compatibility and properties of polyhydroxyalkanoates. Coffee Grounds Composites. *Polymer Composite*. 2023. Vol. 44. P. 1175–1187.
12. Alharbi M., Bairwan R. D., Rizg W. Y., Khalil H. A., Murshid S. S., Sindi A. M., Abdullah C. K. Enhancement of Spent Coffee Grounds as Biofiller in Biodegradable Polymer Composite for sustainable packaging. *Polymer Composite*. 2024. Vol. 45. P. 9317–9334.

Bibliography (transliterated)

1. Lebreton L., Andrady A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*. 2019. Vol. 5. No. 1. P. 1–11.
2. Houssini K., Li J., Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6. No. 1. P. 257.
3. Tilsted J. P. Ending fossil-based growth: confronting the political economy of petrochemical plastics. *One Earth*. 2023. Vol. 6. No. 6. P. 607–619.
4. Shen M. (Micro) plastic crisis: un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 254. P. 120138.
5. Zhao X., Cornish K., Vodovotz Y. Narrowing the gap for bioplastic use in food packaging: an update. *Environmental science & technology*. 2020. Vol. 54. No. 8. P. 4712–4732.
6. Supri S., Felicia W. X. L., Affandy M. A. M., Padam B. S., Prihanto A. A., Rovina K. Macroalgae-Based Bio-Based Packaging: characteristics, green extraction methods, and applications as sustainable solutions. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. 2025. Vol. 15. No.1. P. 249–266.
7. Samir A., Ashour F. H., Hakim A., Bassyouni M. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *Npj Materials Degradation*. 2022. Vol. 6. No. 1.

8. de Bomfim A. S. C. et al. Effect of spent coffee grounds on the crystallinity and viscoelastic behavior of polylactic acid composites. *Polymers*. 2023. Vol. 15. No. 12. P. 2719.
9. Boey J. Y. et al. The effect of spent coffee ground (SCG) loading, matrix ratio and biological treatment of SCG on poly (hydroxybutyrate)(PHB)/poly (lactic acid)(PLA) polymer blend. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 266. P. 131079.
10. Gaidukova G., Platnieks O., Aunins A., Barkane A., Ingrao C., Gaidukovs S. Spent coffee waste as a renewable source for the production of sustainable poly(butylene succinate) biocomposites from a circular economy perspective. *RSC Advances*. 2021. Vol. 11. P. 18580.
11. Tang L., Hou X., Wang J., Pan L. Effect of different chemical surface treatments on interfacial compatibility and properties of polyhydroxyalkanoates. Coffee Grounds Composites. *Polymer Composite*. 2023. Vol. 44. P. 1175–1187.
12. Alharbi M., Bairwan R. D., Rizg W. Y., Khalil H. A., Murshid S. S., Sindi A. M., Abdullah C. K. Enhancement of Spent Coffee Grounds as Biofiller in Biodegradable Polymer Composite for sustainable packaging. *Polymer Composite*. 2024. Vol. 45. P. 9317–9334.

УДК 622.74

М. С. Кочетов, аспірант, Г. М. Черкашина, канд. техн. наук, доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ БІОПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО БІОПЛАСТИКУ ТА ВІДПРАЦЬОВАНОЇ КАВОВОЇ ГУЩІ

Мета статті – дослідження екологічно безпечних біополімерних композитів на основі термопластичного біопластику та відпрацьованої кавової гущі. Об'єктами експериментального дослідження були волога кавова гуща з сортів Робусти та Арабіки у співвідношенні 50:50 мас. %, зібрані в 8 різних кав'ярнях «Аромакава» міста Харкова та термопластичний біопластик марки GEMABIO F (Gema Polimer Plastik Ürünleri San. ve Tic. A.S., Турція) на основі ПБАТ, який містить відновлювану сировину і має до 90 % вмісту вуглецю біопроходження. Вироби з GEMABIO повністю біорозкладні та компостуються залежно від товщини виробу. Густина біопластику складає $1,33 \text{ г/см}^3$ з індексом плинності розтопу (MFI) 2-4 г/10 хв (190°C , 2,16 кг). Показано, що сучасний період розвитку полімерного матеріалознавства характеризується підвищеним науковим і комерційним інтересом до сумішевих матеріалів на основі відходів біопластиків та органічних наповнювачів внаслідок практично необмежених можливостей швидкого та економічно вигідного розширення їх асортименту під конкретне застосування. Було досліджено гранулометричний склад кавової гущі. Для цього кавову гущу просівали через розміри сит 400, 200 та 100 мкм. Фактично, для дослідженої кавової гущі, характерне унімодальність гранулометричного складу з максимум при 200 мкм. З результатів морфологічних досліджень кавової гущі показано, що вона характеризується пластинчастою структурою частинок, а частинки усіх фракцій кавової гущі вкриті смоляними або маслянистими речовинами. Показано, що поверхня термопластичного біопластику марки GEMABIO F має характер близький до нейтрального зі слабо-основною силою

активних центрів $pK_a \approx 7,08-7,36$, поверхня кавової гущі має характер також близький до нейтрального зі слабо-кислотою силою активних центрів $pK_a \approx 6,30-6,47$. Встановлено, що модифікація термопластичного біопластику марки GEMABIO F КГ дозволяє підвищити комплекс його технологічних характеристик та здатність до переробки традиційними методами для термопластів (екструзія, лиття під тиском та ін.) в вироби для пакування та тари харчових та нехарчових продуктів: лотки, бокси, стакани, контейнери та т.п.

Ключові слова: екологія, безпека, біополімери, композити, термопластичність, кавова гуща.

M. S. Kochetov, A. M. Cherkashina

RESEARCH OF ENVIRONMENTALLY SAFE BIOPOLYMER COMPOSITES BASED ON THERMOPLASTIC BIOPLASTICS AND WASTED COFFEE GROUNDS

The purpose of the article is to study environmentally safe biopolymer composites based on thermoplastic bioplastics and used coffee grounds. The objects of the experimental study were wet coffee grounds from Robusta and Arabica varieties in a ratio of 50:50 by mass. %, collected in 8 different coffee shops "Aromakawa" in the city of Kharkiv and thermoplastic bioplastic brand GEMABIO F (Gema Polimer Plastik Ürünleri San. ve Tic. A.S., Turkey) based on PBAT, which contains renewable raw materials and has up to 90 % of carbon content of bio-origin. Products made of GEMABIO are fully biodegradable and compostable depending on the thickness of the product. The density of the bioplastic is 1.33 g/cm^3 with a melt flow index (MFI) of 2–4 g/10 min (190°C , 2.16 kg). 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 bioplastic waste and organic fillers due to the practically unlimited possibilities of rapid and economically profitable expansion of their range for specific applications. The granulometric composition of coffee grounds was investigated. For this purpose, the coffee grounds were sieved through sieve sizes of 400, 200 and $100 \mu\text{m}$. In fact, the studied coffee grounds are characterized by unimodality of the granulometric composition with a maximum at $200 \mu\text{m}$. The results of morphological studies of coffee grounds show that it is characterized by a lamellar structure of particles, and the particles of all fractions of coffee grounds are covered with resinous or oily substances. It is shown that the surface of the thermoplastic bioplastic of the GEMABIO F brand has a character close to neutral with a weakly basic strength of active centers $pK_a \approx 7.08-7.36$, the surface of coffee grounds also has a character close to neutral with a weakly acidic strength of active centers $pK_a \approx 6.30-6.47$. It has been established that the modification of thermoplastic bioplastic of the GEMABIO F KG brand allows to increase the complex of its technological characteristics and the ability to be processed by traditional methods for thermoplastics (extrusion, injection molding, etc.) for processing into products for packaging and containers of food and non-food products: trays, boxes, glasses, containers, etc.

Keywords: environmentally safe, biopolymer, composites, thermoplastic processed, coffee grounds.

«ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ»

Щоквартальний науково-практичний журнал

Редколегією до опублікування приймаються статті, написані **державною мовою**, за наступними науковими напрямками:

- ✓ *енергетика та енергозбереження; енерготехнологія енергоємних галузей промисловості; нетрадиційна енергетика; ресурсозбереження; енергетика та навколишнє середовище;*
 - ✓ *тепловикористовуючі установки; моделювання процесів промислового обладнання; процеси та апарати різних галузей промисловості (хімічної, харчової, медичної та ін.);*
 - ✓ *застосування ЕОМ в технологічних процесах; автоматизовані системи управління та обробки інформації;*
 - ✓ *тепло- і масообмінні процеси та обладнання спеціальної техніки; теплові процеси та кріогенне устаткування медичного призначення;*
 - ✓ *електроенергетика; обладнання електростанцій і передача електроенергії;*
 - ✓ *економічні аспекти енергетики й промислової екології; комерційний інжиніринг, реінжиніринг та технологічний менеджмент,*
- а також інших напрямкам на межі різних галузей знань.*

Матеріали до опублікування в кожний наступний номер приймаються до 20 числа останнього місяця попереднього кварталу. Рукописи авторам не повертаються.

Електронна версія статті має бути підготовлена у редакторі текстів MS Word for Windows версій 97, XP, 2000 або 2003. Сама стаття має бути роздрукована у 2-х примірниках. До матеріалів мають додаватися експертний висновок про можливість опублікування матеріалів у відкритій пресі; рецензія доктора наук за профілем статті.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ:

Розмір сторінки А4 (210х297 мм); ліве і праве поля – 25 мм, верхнє і нижнє – 30 мм; рекомендований шрифт Times New Roman Суг; розмір шрифту – 12; міжрядковий інтервал – 1.

ПОРЯДОК РОЗМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛУ:

- безпосередньо під верхньою межею зліва ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ друкується УДК статті;
- пропустивши один рядок, по центру друкуються ініціали та прізвища авторів, їх науковий ступінь та звання;
- пропустивши один рядок, по центру напівжирним шрифтом ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ друкується назва статті;
- нижче, пропустивши одну строку, друкується назва організації, де працюють автори статті;
- після – розміщуються ключові слова;
- пропускається один рядок і з абзацу (1,25 см) друкується основний текст, відформатований по ширині сторінки;
- перед і після формул і рівнянь має бути відстань в один порожній рядок до тексту з інтервалом 1;
- формули і рівняння мають бути вирівняні по центру;
- номери формул і рівнянь повинні бути вирівняні по правому краю;
- розмір шрифту формул і рівнянь для основного тексту – 12 пт.;
- рисунки, схеми і графіки мають бути виконані в чорно-білому зображенні;
- пропустивши один рядок, подається список літератури, оформлений відповідно до вимог ДСТУ 8302:2015. Список Використаної літератури експериментальної (оригінальної) статті має містити не менше ніж 12 джерел (оптимально – 20–40), оглядової – від 50 джерел, серед яких українськомовних – не більш як 30 %.
- далі розміщується транслітерація списку літератури;
- у кінці статті двома мовами (українська та англійська) мають бути надруковані УДК, автори, назва і анотація. Мінімальна кількість символів кожної анотації – 1800 знаків.

Окремо в редколегію подаються відомості про авторів з їх адресами Email та ORCID.

СТАТТІ, ОФОРМЛЕНІ НЕ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ, РЕДКОЛЕГІЯ НЕ РОЗГЛЯДАЄ ТА НЕ РОЗМІЩУЄ У ЖУРНАЛІ

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ

Україна, 61002,

Харків-2, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ», редколегія журналу «Інтегровані технології та енергозбереження»,
технічний редактор: к.техн.н., професор Горбунов К.О.

Тел. (057) 707-69-58.

Факс (057) 720-22-95.

Email: gor.kona2016@gmail.com

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

4'2025

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 01.12.2025 р. Формат $60 \times 84 \frac{1}{8}$. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 9,4. 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.