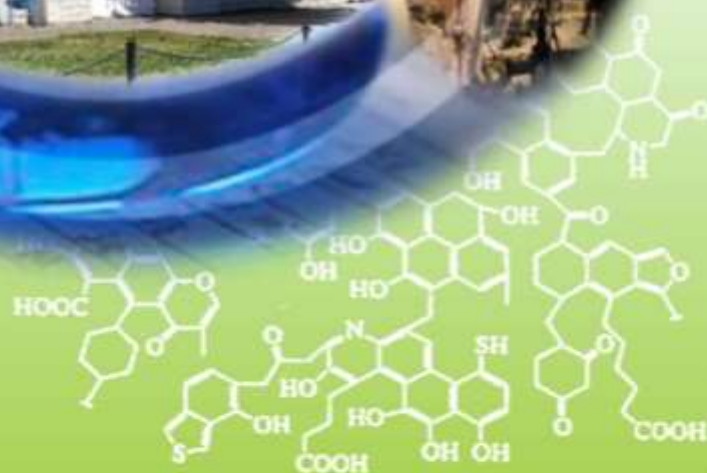
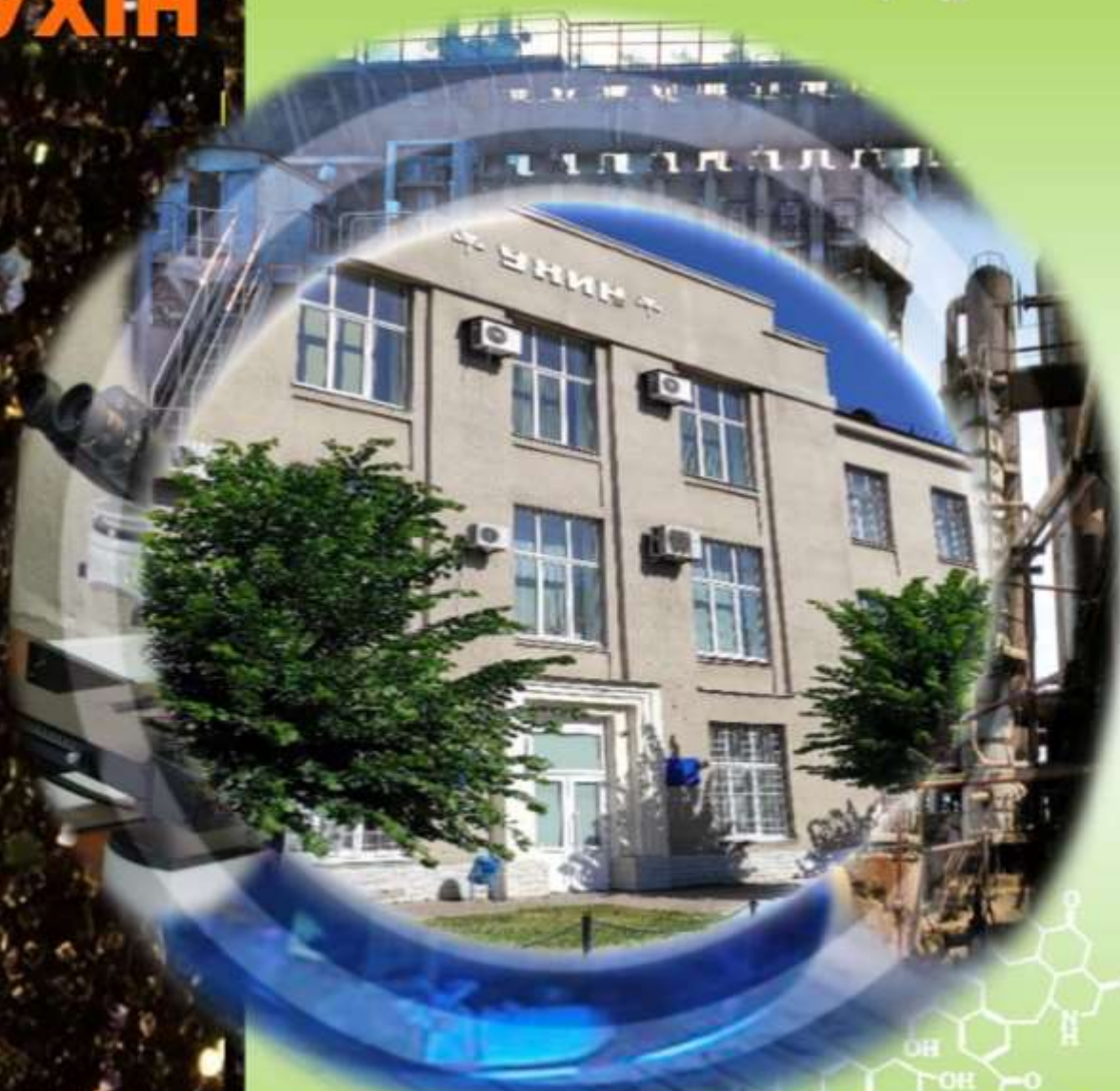


ISSN 1681-309X

ВуглеХімічний журнал



2 2026

Державне підприємство «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)» виконує весь комплекс наукових досліджень щодо вивчення вугілля, підготовки вугільних шихт, коксування вугілля і вугільних шихт, переробки продуктів коксування, очищення стічних вод і захисту навколишнього середовища коксохімічних заводів і виробництв, стандартизації, метрології.



Наказом МОН України від 02.07.2020 № 886

Вуглехімічний журнал включено до категорії **Б** Переліку наукових фахових видань України.

Галузі науки: **технічні, економічні**. Спеціальності: **51; 102; 161**.

Вуглехімічний журнал індексується в міжнародній наукометричній базі

Index Copernicus

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор: с.н.с., к.т.н. О.Л. Борисенко (м. Харків).

Заступник головного редактора: проф., д.т.н. А.Г. Старовойт (м. Дніпро)

Члени редколегії: ст. досл., д.т.н. Л.П. Банніков, (м. Харків), проф., д.т.н. О.Б. Гринишин (м. Львів), ст. досл., Ph.D. В.В. Коваль, відп. секретар (м. Харків), проф., д.т.н. Д.В. Мірошніченко (м. Харків), проф., д.т.н. Ю. Озолінс (м. Рига, Латвія), проф., д.т.н. В.О. Панасенко (м. Харків), проф., д.т.н. С.В. Пиш'єв (м. Львів), д.х.н. Є.О. Посохов (м. Харків), доц., к.х.н., Т.І. Червінський (м. Львів), проф., д.х.н. Т.Г. Шендрік (м. Київ), ст. досл., Ph.D. А. Шишкін (м. Рига, Латвія), доц., к.т.н. І.В. Шульга (м. Харків)

ЕКСПЕРТНА ГРУПА

проф., д.т.н. В.М. Гуляєв, проф., д.т.н. О.М. Касімов, проф., д.т.н. Є.Т. Ковальов, доц., к.т.н. Ю.В. Луценко, к.т.н. А.Ю. Мартинова, к.т.н. М.О. Соловійов, с.н.с., д.т.н. Ф.Ф. Чешко

ВуглеХімічний журнал

2

Науково-виробничий
журнал

Виходить шість номерів
на рік

Заснований у вересні
1993 р

ЗАСНОВНИКИ:

Українська науково-
промислова
асоціація
«УКРКОКС»

ДЕРЖАВНЕ
ПІДПРИЄМСТВО
«УКРАЇНСЬКИЙ
ДЕРЖАВНИЙ
НАУКОВО-
ДОСЛІДНИЙ
ВУГЛЕХІМІЧНИЙ
ІНСТИТУТ
(УХІН)»

Державне
підприємство
«Державний інститут
по проектуванню
підприємств
коксохімічної
промисловості»
(ДП «ГИПРОКОКС»)

При передруці матеріалів
посилання на журнал
обов'язкове.

За зміст рекламних матері-
алів редакція
журналу відповідальності
не несе.

Ціна договірна.

Зміст

стор.

- Шульга І.В., Телешев Ю.В.** Дослідження властивостей коксівного вугілля для розробки раціональної схеми його підготовки 3
- Савченко В.В., Дорошенко К.О.** Кінетика деемульгації водо-оливних систем із застосуванням реагентів на основі естерів гумінових кислот 12
- Шевченко К.В., Григоров А.Б.** Залучення сільськогосподарських відходів як альтернативи нафтовій та коксохімічній сировині у виробництві автомобільних бензинів 18
- Жаров С.Л., Квасов О.В.** Оптимізація алкідних / епоксидних емальових систем на основі рецептури для покращення антикорозійних властивостей сталевих поверхонь 28
- Марченко В.В., Набока С.А.** Оцінка продуктивності регенованого метилацетату в промисловому виробництві емалей за допомогою установки ECO PLUS 122 40

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-2-1-52

© ДП «УХІН», «Вуглехімічний журнал», 2026
ISSN 1681-309X



Journal of Coal Chemistry

2

Contents

page.

Bimonthly scientific and
technical journal
Founded in 1993

FOUNDERS:

Ukrainian Scientific-
Industrial
Association
«UKRKOKS»

STATE ENTERPRISE
«UKRAINIAN
STATE
RESEARCH
INSTITUTE
FOR CARBOCHEMISTRY
(UKHIN)»

State enterprise «State
Institute for Designing
Enterprises of Coke Oven
and By-product Plants»
(SE «GIPROKOKS»)

Mention of the source when
reprinting papers is
obligatory.

The Editorial Board is not
responsible for the content of
advertising materials.

The price is subject to agree-
ment.

- | | |
|---|----|
| Shulga I.V., Teleshev Yu.V. Study of coking coal properties for development of a rational scheme for its preparation | 3 |
| Savchenko V.V., Doroshenko K.O. Kinetics of demulgation of water-oil systems using reagents based on humic acid esters | 12 |
| Shevchenko K.V., Grigorov A.B. Utilization of agricultural waste as an alternative to petroleum and coke-chemical raw materials for the production of automotive gasolines | 18 |
| Zharov S.L., Kvasov O.V. Formulation-driven optimization of alkyd / epoxy-ester primer-enamel systems for enhanced anticorrosion performance of steel substrates | 28 |
| Marchenko V.V., Naboka S.A. Performance assessment of regenerated methyl acetate in industrial enamel manufacturing with the ECO PLUS 122 UNIT | 40 |

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-2-1-52

© SE «UKHIN», Journal of Coal Chemistry, 2026
ISSN 1681-309X

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОКСІВНОГО ВУГІЛЛЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ РАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ЙОГО ПІДГОТОВКИ© І.В. Шульга¹, Ю.В. Телешев²*ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)», 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна*¹ Шульга Ігор Володимирович, канд. техн. наук, доц., с.н.с., зав. коксового відділу, ORCID: 0009-0007-8677-9180, Scopus ID: 59473856500, e-mail: ko@ukhin.org.ua² Телешев Юрій Володимирович, канд. техн. наук, Scopus ID: 6602924103, e-mail: 196112juv@gmail.com

Коксохімічні підприємства використовують вугілля різних марок, що надходить від великої кількості постачальників. Тому на одному з провідних коксохімічних підприємств України відібрані представницькі проби вугілля, що входять до його сировинної бази, досліджений їх гранулометричний склад та технологічні властивості класів крупності. Підтверджено, що рівень подрібнення вугілля справляє суттєвий вплив на технологічні властивості вугільної шихти. Найціннішими з цієї точки зору в петрографічно однорідному вугіллі є класи крупності 3-0,5 мм. Грубіші зерна мають меншу величину питомої поверхні, що не дозволяє брати їм активну участь в поверхневій гетерогенній взаємодії з іншими складовими вугільної засипки на стадіях спікання та коксоутворення. Навпаки, переподрібнення вугільних зернин призводить до явища т.зв. «самоопіснення», внаслідок чого ускладнюється реалізація притаманного вугіллям та шихтам потенціалу спікливості. Петрографічно неоднорідне вугілля має ще складнішу та неоднозначну залежність технологічних властивостей від ступеню подрібнення, що вимагає проведення спеціальних досліджень в кожному конкретному випадку. Окрім цього, надмірне подрібнення вугілля призводить до збільшення кількості твердих частинок, які виносяться газами завантаження з камери коксування до газозбірника, внаслідок цього збільшується вихід фусів та погіршується якість смоли за показниками щільності та вмісту нерозчинних речовин. Нарешті, надмірне переподрібнення вугілля призводить до непродуктивних витрат електроенергії. За недостатнього ступеню подрібнення шихти також відбувається погіршення умов експлуатації коксових печей: погіршується рівномірність прогріву вугільної засипки, відбувається збільшення зусилля видачі коксового пирога, погіршується якість коксу.

Ключові слова: коксохімічне виробництво; вугілля; вуглепідготовка; вугільна шихта; подрібнюваність; оптимальна крупність; якість коксу.

Автор для листування І.В. Шульга, e-mail: ko@ukhin.org.ua

Рукопис надійшов до редакції 18.02.2026

Прийнято до публікації 30.03. 2026

Опубліковано 17.04.2026

Ця стаття ліцензується відповідно до міжнародної ліцензії CC BY 4.0

Використовуване на коксохімічних підприємствах вугілля різних марок має різну механічну міцність, а, отже, і подрібнюваність [1], а також різну вихідну крупність, що не дозволяє досягти їх оптимального подрібнення за однакового режиму вуглепідготовки різних компонентів шихти, навіть якщо вони належать до однієї марки [2].

Метою дослідження є розробка раціональної схеми підготовки вугілля для коксування, яка дозволить:

- виключити надмірне подрібнення м'яких добре спікливих компонентів вугільної шихти,
- якнайповніше використати потенціал спікливості всіх марок вугілля,
- зменшити витрату електроенергії на подрібнення,
- забезпечити сприятливі умови експлуатації коксових печей.

Завданням, яке вирішувалось на даному етапі досліджень, було вивчення технологічних властивостей компонентів вугільної шихти одного з провідних коксохімічних підприємств

України за їх класами крупності, що необхідне для наступного визначення ефективності існуючої схеми подрібнення вугілля та розробки рішень з її удосконалення.

Таблиця 1

Ситовий склад вугілля, що надходить на підприємство (визначення в апараті «Ситан»)

Вугілля	Марка	Партія	Вміст у % класів крупності, мм			
			>6	6-3	3-0,5	<0,5
А	Г	A1	39,7	14,5	26,0	19,8
		A2	50,1	11,4	20,6	17,9
		A3	37,2	16,5	27,7	18,6
		A4	42,7	19,8	35,4	2,1
		середнє	42,4	15,6	27,4	14,6
В	Г	B1	48,9	14,4	29,9	6,8
		B2	55,5	13,9	20,2	10,4
		B3	37,2	15,2	18,4	29,3
		середнє	43,0	14,8	24,1	18,1
С	Г	С1	44,3	15,5	24,7	15,5
D	Г	D1	49,0	14,8	20,0	16,2
Е	ГЖ+К	E1	44,9	13,0	23,6	18,5
		E2	35,9	15,3	27,2	21,6
		середнє	40,3	14,2	25,4	20,1
F	Ж	F1	12,5	14,9	30,7	41,9
		F2	24,7	14,6	27,5	33,2
		F3	19,7	18,6	56,1	5,6
		F4	22,5	20,8	34,9	21,8
		F5	16,5	18,8	39,3	25,4
		середнє	19,2	17,5	37,7	25,6
G	Ж	G1	15,3	37,1	35,9	11,7
		G2	19,5	17,3	60,2	3,0
		G3	25,0	14,2	38,4	22,4
		G4	10,6	11,3	46,0	32,1
		середнє	17,6	20,0	45,1	17,3
Н	Ж	Н1	17,6	9,8	27,3	45,3
I	К	I1	15,1	13,3	45,1	26,5
		I2	14,0	13,0	59,7	13,3
		I3	15,8	11,9	69,5	2,8
		I4	9,6	8,3	34,1	48,0
		I5	13,4	10,1	39,4	37,1
		I6	21,2	10,8	34,0	34,0
		I7	19,9	8,2	24,9	47,0
		середнє	15,6	10,8	43,8	29,8
J	К	J1	15,7	12,2	31,3	40,8
		J2	9,6	9,6	54,9	25,9
		J3	14,2	13,1	41,0	31,7
		J4	17,2	16,8	39,2	26,8
		середнє	14,2	12,9	41,6	31,3
К	ПС	K1	11,3	12,2	33,8	42,7
		K2	8,0	9,8	32,5	49,7
		середнє	9,7	11,0	33,2	46,2

Для вирішення поставленого завдання працівниками підприємства та ДП «УХІН» тричі в різні періоди часу (холодна, тепла пори року та перехідний період) були відібрані представницькі проби вугільних концентратів, що надходили на підприємство. Ці проби були скорочені до маси не менш ніж 3 кг кожна, а потім всі скорочені проби були розділені на дві частини. Перша з цих частин використовувалась для визначення ситового складу вугілля на механічному аналізаторі «Ситан» [3] у ВТК підприємства, а другу частину проби доставили до ДП «УХІН» для дослідження технологічних властивостей за класами крупності.

Результати визначення на підприємстві ситового складу проб прибулого вугілля наведені в табл. 1. З цих даних видно, що проби концентратів різних збагачувальних фабрик мають різний гранулометричний склад.

Як і слід було очікувати, найбільшу кількість грубих класів містить найбільш механічно міцне газове вугілля. Решта вугілля має, як правило, меншу міцність, та, відповідно, більший вміст в пробі дрібних класів. Це в цілому підтверджує правильність використовуваної на заводі схеми підготовки шихти до коксування, у відповідності з якою газове вугілля окремо піддають попередньому подрібненню, а потім, вже у складі шихти – остаточному подрібненню. Решта ж компонентів шихти подрібнюється в її складі лише на стадії остаточного подрібнення.

Слід зазначити, що вугілля Е, яке, за даними постачальника, є сумішшю марок Г, Ж та К, за своїм гранулометричним складом близьке до типового газового вугілля, що надходить на підприємство: воно в середньому містить 54,5 % класів >3 мм, що лише трохи поступається вмісту аналогічного класу в газовому вугіллі, середні значення якого для різних постачальників знаходяться в межах 57,8-63,8 %. Це свідчить про близькість властивостей цього концентрату перш за все до газового вугілля та про необхідність його попереднього подрібнення.

В той же час дані табл. 1 свідчать про помітний вплив гранулометричного складу вугілля в різних партіях одного й того ж самого концентрату. Найсильніше це виявляється в різному вмісті грубих класів в різних партіях однієї збагачувальної фабрики для найбільш міцного газового вугілля, а також у вмісті класу 3,0-0,5 мм, який має, як правило, близькі до оптимальної для даної марки технологічні властивості практично для всього більш м'якого вугілля, за виключенням лише вугілля D та K. Слід також зазначити різний вміст класу <0,5 мм майже для усіх фабрик, окрім вже зазначених. Такі коливання зумовлені перш за все зміною в часі продуктивності відділень флотації цих фабрик, що може спричинювати суттєві коливання технологічних

властивостей відповідної фабрики в різних партіях, а також петрографічного складу вугілля, особливо за збагачення на одній фабриці вугілля різних марок. Все це свідчить про необхідність максимального використання технологічних властивостей вугільних складів підприємства для усереднення вугілля. В протилежному випадку коливання технологічних властивостей вугілля, зумовлені зміною його гранулометричного складу, навіть за стабільного режиму вуглепідготовки неминуче призведуть до коливань властивостей вугільних шихт, а, отже, до ускладнення умов експлуатації коксових печей та в кінцевому підсумку – до погіршення якісних показників коксу.

Також слід зазначити, що прибулі на підприємство вугільні концентрати марок Ж, К та ПС в більшості випадків вже мають необхідний або близький до такого рівень подрібнення з урахуванням спікливості. Зумовлене це пониженою механічною міцністю вугілля цих марок, що призводить до їх значного подрібнення вже за механізованого видобутку. Звідси випливає, що за підготовки вугілля на підприємстві головну увагу слід приділяти попередньому подрібненню газового вугілля з метою забезпечення його прийнятної гранулометричного складу вже на цій стадії. За остаточного ж подрібнення шихти рівень механічного впливу не має бути занадто великим, оскільки при цьому в першу чергу подрібнюватиметься більш м'яке та вже достатньо дрібне добре спікливе вугілля. Це призведе до нераціональної витрати електроенергії та переподроблення добре спікливого вугілля. Негативним наслідком цього стане збільшення в шихті вмісту дрібних пиловидних класів (<0,5 мм), що, в свою чергу, призведе до погіршення умов експлуатації коксових печей (ускладнення сходження шихти з бункерів вуглезавантажувального вагону, збільшення викидів шкідливих речовин при завантаженні печей, підвищений винос пилу до стояків та газозбірників, заростання стояків, збільшення кількості фусів, погіршення якості смоли) та сприятиме погіршенню процесів спікання і коксоутворення в камері внаслідок невиправданого збільшення поверхні взаємодії вугільних зернин за тієї ж або навіть меншої кількості утворюваних за термічної деструкції переподробленого матеріалу рідкорухливих продуктів. Такий негативний вплив на спікливість вугілля механохімічних факторів носить назву самоопіснення.

З метою дослідження технологічних властивостей класів крупності доставлені до ДП «УХІН» проби концентратів були об'єднані. Спочатку з цих об'єднаних проб визначили показники ситового складу на дослідницькій установці з більшою у порівнянні з типовим промисловим аналізатором «Ситан» кількістю сит. Результати визначення подані в табл. 2.

Таблиця 2

Ситовий склад вугілля (визначення на установці ДП «УХІН»)

Вугілля	Марка	Ситовий склад у % за класами крупності, мм						
		>13	13-6	6-3	3-1	1-0,5	<0,5	<3
A	Г	32,9	15,9	12,1	19,2	9,2	10,7	51,2
B	Г	44,4	16,6	9,9	14,4	6,2	8,5	39,0
C	Г	33,1	25,2	12,0	15,5	5,9	8,3	41,7
E	ГЖ+К	16,0	21,5	17,3	20,8	9,7	14,7	45,2
F	Ж	11,6	13,1	14,1	28,2	13,6	19,4	75,3
G	Ж	9,6	10,6	10,1	27,1	16,2	26,4	79,8
I	К	7,7	6,6	8,1	21,9	19,0	36,7	85,7
J	К	5,7	10,2	9,5	27,5	20,6	26,5	84,1
L	К	13,9	17,2	14,5	18,1	12,0	24,3	54,4
K	ПС	3,7	8,9	9,4	24,9	17,9	35,2	87,4
M	К	-	4,8	14,8	28,8	13,5	38,1	80,4

Наведені дані добре погоджуються з результатами визначення на заводському устаткуванні та доповнюють їх. Зокрема, підтверджений факт ступеню подрібнення прибулого вугілля марок Ж, К та ПС (за винятком проби вугілля L), достатнього для використання їх у шихтах без подрібнення на підприємстві. При цьому в концентратах I та K відзначається значна кількість пиловидних класів <0,5 мм, що може призвести до значених вище негативних явищ в експлуатації печей та погіршення якості смоли. Звертає також на себе увагу менший у порівнянні з петрографічно однорідним газовим вугіллям вміст найгрубішого класу >13 мм у вугіллі E. При цьому необхідно перевірити ефективність попереднього подрібнення цього вугілля разом з іншим газовим вугіллям, яке суттєво відрізняється від вугілля E за розподілом класів крупності. Таке сумісне подрібнення є невід'ємною особливістю технології вуглепідготовки на першому блоці підприємства. За неможливості ефективного попереднього подрібнення вугілля E в суміші з іншим газовим вугіллям його використання має здійснюватись лише на другому блоці підприємства, де є можливість для індивідуального попереднього подрібнення кожного газового вугілля окремо.

Також необхідно зазначити більший вміст грубих класів та, відповідно, недостатній вихідний ступінь подрібнення для прибулої на завод партії концентрату L. Це зумовлене в першу чергу особливостями технологічної схеми збагачувальної фабрики, де відсутнє флотаційне відділення.

В табл. 3 наведена якісна характеристика концентратів, що входять до сировинної бази підприємства. З цих даних видно, що досліджене вугілля в цілому виявляє комплекс властивостей, типових для відповідних постачальників. Слід зазначити, що в період проведення досліджень спікльвість більшості концентратів, оцінювана за товщиною пластичного шару Y в мм, від-

повідала вимогам технічних умов та навіть дещо перевищувала їх, як це мало місце у проб F, G та особливо I. Слід зазначити також відповідність властивостей вугілля J хоча б нижній межі вимог для марки K. Це зумовило дещо підвищену спікльвість шихти в цілому, як буде показано нижче. Основу заводської шихти складає високосірчисте петрографічно однорідне вугілля, що, природно, визначає і високу сірчистість шихти та отримуюваного з неї коксу. Виключенням є петрографічно неоднорідне вугілля E та маловідновлене вугілля L та M.

Тут-таки наведені дані про розмолоздатність компонентів вугільної шихти за методикою Хардгрова. Ці результати свідчать, що найменшою розмолоздатністю, а, отже, й найбільшою міцністю, характеризується, як і слід було очікувати, газове вугілля. Розмолоздатність жирного вугілля вища в $\approx 1,5$ рази, а вугілля марок K та ПС – приблизно вдвічі.

Дані табл. 3 підтверджуються і результатами петрографічного аналізу, наведеними в табл. 4. Більшість досліджених концентратів має переважний вміст вітриніту, що відповідає заявленій постачальником марці. Виключеннями в цьому плані є вугілля A, J, L та M. В першого з них вітриніт, що відповідає марці Г, складає лише 50 %, ще 15 % відповідають менш цінній марці ДГ, а 33 % – більш цінній марці Ж. З урахуванням цього, що розподіл вітриніту має зсув у бік більш цінної марки, використання такого концентрату в шихтах є цілком прийнятним.

У вугіллі J марці K відповідає 41 % вітриніту, ще 40 % – марці ПС, а 11 % – марці Ж. Ця фабрика, разом із маловідновленим вугіллям нижнього карбону, переробляє і типове петрографічно однорідне вугілля середнього карбону. Внаслідок цього в концентраті значно зросла сірчистість, однак поліпшилась і спікльвість. Враховуючи значний обсяг постачання цього вугілля, його

використання є, як і раніше, є необхідним, особливо беручи до уваги дефіцит вугілля марки ПС. Але це вугілля, як і раніше, не може розглядатись як рівноцінна заміна вугіллю І. Воно має складуватись на підпри-

ємстві та дозуватись до шихти окремо від інших концентратів, за складання шихт слід враховувати петрографічний склад та розглядати це вугілля як суміш марок К та ПС у приблизно рівному співвідношенні.

Таблиця 3

Якісна характеристика концентратів, що входять до сировинної бази підприємства

Вугілля	Марка	Технічний аналіз, %				Пластометричні показники, мм		Спільна здатність за Рога RI	Температурний інтервал пластичності, °С				В'язкість пластичної маси за Гізелером, %хв	Розмолотність за Хардгро-вом, %
		A ^d	S ^d _t	V ^d	V ^{daf}	X	Y		t ₁	t ₂	t ₃	Δt		
A	Г	8,1	2,08	34,6	37,6	40	14	75	377	426	459	82	4964	42
B	Г	6,2	1,71	35,3	37,7	44	12	67	380	425	457	77	2470	40
C	Г	7,0	2,32	35,2	37,8	40	13	73	380	426	455	75	2580	42
E	ГЖ+К	10,2	0,56	31,8	35,4	33	15	74	376	424	466	90	6392	46
F	Ж	8,8	3,41	29,8	32,7	12	30	86	365	430	470	105	>10800	68
G	Ж	8,1	2,40	29,1	31,6	0	29	85	370	425	475	105	>10800	72
I	К	7,4	2,23	23,2	25,0	6	25	80	366	445	491	125	7920	88
J	К	8,8	2,19	19,4	21,2	15	13	41	416	470	491	75	170	85
K	ПС	7,5	1,77	16,5	17,9	6	11	32	432	470	490	58	33	86
L	К	9,2	0,76	26,2	28,9	16	12	65	405	440	470	65	75	80
M	К	9,2	1,01	27,0	29,7	19	13	67	400	440	470	70	205	80

Таблиця 4

Петрографічна характеристика концентратів, які входять до сировинної бази підприємства

Вугілля	Марка	Петрографічний склад, %					Сума опіювальних компонентів ΣОК	Середній показник відбиття вітриніту R ^o , %	Стадії метаморфізму вітриніту, %					
		Вітриніт Vt	Семівітриніт Sv	Інертиніт I	Липтиніт L	0,5-0,64			0,65-0,89	0,9-1,19	1,2-1,39	1,4-1,69	1,7-2,2	
						Марки вугілля, що умовно відповідають стадії метаморфізму вітриніту								
								ДГ	Г	Ж	К	ПС	П	
A	Г	77	1	14	8	15	0,82	15	50	33	2	-	-	-
B	Г	78	1	15	6	15	0,80	10	70	20	-	-	-	-
C	Г	84	-	13	3	13	0,79	8	86	6	-	-	-	-
E	ГЖК	83	2	14	1	15	0,81	2	87	11	-	-	-	-
F	Ж	85	1	13	1	14	0,94	-	36	61	1	2	-	-
G	Ж	90	1	7	2	8	1,05	-	-	99	1	-	-	-
I	К	89	1	10	-	11	1,28	-	-	9	82	9	-	-
J	К	88	2	10	-	12	1,43	-	-	11	41	40	8	-
K	ПС	91	-	9	-	9	1,56	-	-	-	11	75	14	-
L	К	86	2	9	3	11	1,10	-	15	83	2	-	-	-
M	К	87	1	10	2	11	0,97	-	18	82	-	-	-	-

Таблиця 5

Якісна характеристика класів крупності вугільних концентратів

Вугілля	Марка	Показник	Числові значення для класів крупності в мм					
			>13	13-6	6-3	3-1	1-0,5	<0,5
А	Г	A^d	6,5	6,3	7,7	9,0	11,9	13,7
		S_t^d	2,17	2,22	2,26	2,16	2,17	2,30
		V^d	35,4	35,0	34,3	33,8	31,5	29,7
		V^{daf}	38,3	37,6	37,2	37,2	36,6	35,7
		RI	77	79	79	73	72	59
В	Г	A^d	5,0	5,0	5,7	8,5	9,6	12,9
		S_t^d	1,76	1,81	1,80	1,78	1,72	1,88
		V^d	35,8	35,4	34,5	33,7	32,2	30,5
		V^{daf}	37,6	37,2	36,6	36,8	36,0	35,4
		RI	74	72	70	58	54	30
С	Г	A^d	5,8	7,2	8,2	9,3	9,4	11,1
		S_t^d	2,53	2,15	2,28	2,31	2,07	2,09
		V^d	36,8	35,7	34,4	33,9	33,1	31,4
		V^{daf}	39,1	38,4	37,4	37,4	36,5	35,4
		RI	78	74	74	70	71	59
Е	ГЖК	A^d	9,3	9,6	9,1	10,1	9,9	12,5
		S_t^d	0,61	0,67	0,52	0,56	0,64	0,67
		V^d	30,9	32,8	33,3	32,5	32,4	31,1
		V^{daf}	34,1	36,3	36,6	36,6	36,0	35,5
		RI	67	76	78	77	77	72
F	Ж	A^d	7,9	8,5	7,9	8,2	9,2	12,6
		S_t^d	3,80	3,75	3,39	3,11	2,95	3,11
		V^d	29,8	31,0	31,2	30,3	30,0	29,3
		V^{daf}	32,4	33,8	33,9	33,7	33,6	33,5
		RI	85	88	89	90	89	87
G	Ж	A^d	7,3	8,1	7,4	8,2	8,2	9,7
		S_t^d	3,53	2,71	2,56	2,29	2,12	2,09
		V^d	29,5	28,8	29,2	29,2	28,9	28,6
		V^{daf}	31,8	31,4	31,5	31,9	31,5	31,7
		RI	88	86	88	88	88	87
J	К	A^d	19,1	14,3	9,9	7,4	6,0	8,5
		S_t^d	3,32	2,83	2,64	2,36	2,03	1,75
		V^d	19,3	18,7	18,3	19,2	19,7	19,0
		V^{daf}	23,8	21,9	20,3	20,8	20,9	20,8
		RI	19	51	52	57	62	45
I	К	A^d	22,0	8,6	7,4	5,7	5,2	7,5
		S_t^d	1,66	2,55	2,15	2,24	1,98	2,02
		V^d	20,1	22,1	22,4	23,1	24,1	23,1
		V^{daf}	29,8	24,2	24,2	25,1	25,4	25,0
		RI	57	81	83	85	88	83

Продовження таблиці 5

Вугілля	Марка	Показник	Числові значення для класів крупності в мм					
			>13	13-6	6-3	3-1	1-0,5	<0,5
L	K	A^d	4,9	8,7	8,5	7,7	9,3	13,6
		S_t^d	0,78	0,82	0,79	0,82	0,81	0,74
		V^d	28,7	27,1	26,9	26,5	25,8	24,3
		V^{daf}	30,2	29,7	29,4	28,7	28,5	28,2
		RI	74	67	64	64	53	33
M	K	A^d	-	8,5	17,5	5,7	6,5	12,5
		S_t^d	-	0,99	0,92	0,88	0,91	1,00
		V^d	-	30,5	28,6	28,2	27,8	25,6
		V^{daf}	-	33,4	34,6	29,9	29,7	29,2
		RI	-	63	68	70	68	55
K	ПС	A^d	5,7	5,0	5,5	6,2	8,5	9,2
		S_t^d	1,89	2,15	1,81	1,74	1,75	1,96
		V^d	15,7	16,1	16,6	16,2	16,5	17,1
		V^{daf}	16,6	17,0	17,5	17,3	18,0	18,8
		RI	16	19	28	33	29	40

Концентрати E, L та M практично не містять вітриніту, що відповідає марці K. Для пробі E вітриніт відповідає головним чином газовому вугіллю, що підтверджує дані, отримані за дослідження гранулометричного складу проб та показників технічного аналізу, пластометрії та в'язкості пластичної маси за Гізелером. В двох інших фабриках цей основний мікрокомпонент вугілля відповідає головним чином марці Ж, що є цілком очікуваним з урахуванням сировинної бази фабрик.

Слід також зазначити наявність у вугіллі F значної частки вітриніту (36 %), характерного для газового вугілля. В той же час, з урахуванням загального високого рівня спікливості виробничої шихти, це вугілля можна розглядати як взаємозамінне з G, концентрат якого є типовим жирним вугіллям. Тому складування та дозування цих двох типів вугілля на заводі може здійснюватись разом.

Вугілля I містить 82 % вітриніту, характерного для марки K. Це вугілля в найбільшому ступені відповідає вимогам до коксового вугілля. Підвищений рівень спікливості ($Y=25$ мм) свідчить про переробку на цій фабриці найбільш дефіцитного високоякісного вугілля.

Після розсіву концентратів кожен клас крупності був досліджений окремо. Якісна характеристика класів крупності концентратів, що входять до сировинної бази підприємства, наведена в табл. 5.

Найповніше закономірності розподілу властивостей по класах крупності виявляються в досліджених пробах газового вугілля. Відомо [2], що в петрографічно однорідному вугіллі середнього карбону мінеральні речовини накопичуються переважно в дрібних класах, тому зі

зменшенням крупності класу зольність його збільшується. Через це, а також внаслідок накопичення в дрібних класах найменш міцних сажоподібних інертних компонентів органічної вугільної речовини для дрібних класів зменшуються вихід легких речовин як з сухої, так і з горючої маси, а також спіклива здатність за Рога. Розподіл сірчистості має складніший характер, що зумовлене різною сірчистістю вугілля та неоднаковим вмістом в ньому сірки різних видів. Відомо [4], що сульфатна та органічна сірка накопичуються переважно в дрібних класах, а піритна – в грубих. Тому в залежності від співвідношення цих видів сірки змінюється сірчистість різних класів. Якщо у вугіллі сума сульфатної та органічної сірки більша за вміст піритної сірки, то зі зменшенням крупності класів їх сірчистість, як правило, монотонно зростає. Внаслідок впливу піритної сірки у низці випадків відбувається відхилення від монотонності: збільшується сірчистість грубих або близьких до них проміжних класів. Слід також зазначити, що найбільший вміст піритної сірки має високосірчисте вугілля, тому в ньому відхилення від монотонності може бути настільки суттєвим, що розподіл сірчистості за класами крупності набуває хаотичного характеру.

Зазначені закономірності в цілому зберігаються і для вугілля інших марок. При цьому для жирного та коксового вугілля, через високий рівень їх спікливості, зміна виходу легких речовин та спікливої здатності для різних класів крупності стає значно менш помітною. У вугіллі K марки ПС вихід легких речовин та спіклива здатність, на відміну від решти марок, зростають в найдрібніших класах.

Слід зазначити аномальні властивості грубих класів у вугіллі І та J: перш за все їх надзвичайно високу зольність – 14,3-22,0 %. В той же час це вугілля є одним з найменш міцних, що підтверджується даними про його коефіцієнт розмолотоздатності. Тому наявність помітної кількості грубих класів (5,7-7,7 %) вже само по собі пояснити важко. Навіть візуально у відібраних пробах ці грубі куски (розміром до 100 мм) виглядають сторонніми включеннями. Причиною їх потрапляння до концентрату є, на нашу думку, грубі порушення технології збагачення на фабриках, зокрема, підмішування промпродуктових фракцій до концентрату з метою збільшення виходу останнього. Цю думку підтверджує і те, що після проведення претензійної роботи з постачальниками вміст цих грубих класів в концентраті більше не відзначався, принаймні на цьому підприємстві.

Відомо [4], що вугілля нижнього карбону має відмінний від вугілля середнього карбону та менш чіткий розподіл властивостей за класами крупності. Тому тенденції зміни технологічних властивостей вугілля за класами крупності простежуються менш чітко у вугіллі Е, а також в концентратах L та M, які отримані збагаченням маловідновленого вугілля нижнього карбону, що суттєво відрізняється за своїми властивостями від типового вугілля середнього карбону.

Таким чином, досліджено гранулометричний склад вугілля, що використовується одним з провідних коксохімічних підприємств України, та властивості окремих класів крупності цього вугілля. Потім аналогічний комплекс робіт був виконаний на вугіллі після попереднього та остаточного подрібнення за різних технологічних режимів цих операцій. Це дало можливість визначити раціональний ступінь подрібнення вугілля та перевірити його обґрунтованість шляхом проведення дослідних коксувань. В свою чергу, результати коксувань постали основою для розробки рекомендацій з раціонального рівня подрібнення вугілля на обох блоках підприємства з метою поліпшення технологічних властивостей шихти, забезпечення потрібних умов експлуатації коксових печей та економії електроенергії.

Висновки

1. В цілому підтверджена обґрунтованість прийнятої на підприємстві схеми підготовки вугілля до коксування, у відповідності з якою прибуле газове та петрографічно неоднорідне вугілля піддають попередньому подрібненню, а потім приготована вугільна шихта проходить ще й стадію остаточного подрібнення. Решта ж компонентів шихти подрібнюється в її складі лише раз – на стадії остаточного подрібнення.

2. Показано, що вугілля Е, яке, за даними постачальника, є сумішшю марок ГЖ та К, за своїм гранулометричним складом близьке до типового газового вугілля, яке надходить на підприємство. Це зумовлює необхід-

ність його попереднього (бажано індивідуального) подрібнення.

3. Виявлено помітні коливання ситового складу вугілля між різними партіями одного й того ж самого концентрату. Найсильніше це виявляється в різному вмісті грубих класів в різних партіях одного й того ж самого постачальника для найміцнішого газового вугілля, а також у вмісті класу 3-0,5 мм (який має, зазвичай, близькі до оптимальних для даної марки технологічні властивості) практично для всього м'якого вугілля, за винятком лише вугілля J та K. Слід також зазначити різний вміст класу 3,0-0,5 мм майже для всього вугілля, окрім вже зазначеного. Такі коливання зумовлені перш за все неоднаковою в часі продуктивністю цих фабрик за флотоконцентратом.

4. Прибулі на завод вугільні концентрати марок Ж, К та ПС у більшості випадків (за винятком вугілля L) вже мають необхідний або близький до нього рівень подрібнення з урахуванням спікливості кожної марки.

5. Виявлено закономірності розподілу властивостей вугілля за класами крупності. У вугіллі середнього карбону зі зменшенням грубості класу зольність зростає, а вихід летких речовин та спіклива здатність спадають. Розподіл сірчистості зумовлений неоднаковою сірчистістю вугілля та різним вмістом в ньому сірки різних видів. Якщо у вугіллі переважають сульфатна та органічна сірка, то зі зменшенням крупності класів їх сірчистість, як правило, монотонно збільшується. Внаслідок впливу піритної сірки в низці випадків відбувається відхилення від монотонності: збільшується сірчистість грубих або близьких до них проміжних класів. Для вугілля Ж та К, через високий рівень їх спікливості, зміна виходу летких речовин та спікливої здатності для різних класів крупності стає значно помітнішою.

6. У вугіллі К марки ПС вихід летких речовин та спіклива здатність, на відміну від інших марок, зростають в дрібніших класах.

7. Закономірності розподілу технологічних властивостей для вугілля нижнього карбону (зокрема маловідновленого) простежуються менш чітко, аніж для типового вугілля середнього карбону.

8. Слід зазначити аномальні властивості грубих класів у вугіллі І та J (марка К), перш за все їх надзвичайно високу зольність – 14,3-22,0 %. На нашу думку, причиною їх потрапляння до концентрату є грубі порушення технології збагачення на фабриках, зокрема, підмішування проміжного продукту до концентрату з метою збільшення виходу останнього. Про порушення технології збагачення також свідчить підвищена (17,5 %) зольність класу крупності 6-3 мм у вугіллі М марки К.

Бібліографічний список

1. Коваль В.В. Оптимізація схеми підготовки вугілля до коксування. Дис. на здобуття вченого ступеня

доктора філософії. – Харків: НТУ ХПІ, 2023. – 166 с. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/548b6809-f378-4407-8d45-b9373957c44b/content?trackerId=38008a23499b3f11>

2. Шульга І.В. Основи технології коксування вугілля: / І.В. Шульга, Д.В. Мірошніченко, О.В. Богоявленська. – Харків – Тернопіль: Крок, 2022. – 128 с.

3. Мірошніченко Д.В. Методи контролю якості твердих вуглецевих матеріалів: / Д.В. Мірошніченко, І.В. Шульга, Д.Ю. Білець, І.В. Сінкевич. – Харків - Тернопіль: Крок, 2022. – 228 с.

4. Шульга І.В. Фізика та хімія твердих горючих копалин: / І.В. Шульга, Д.В. Мірошніченко. – Харків – Тернопіль: Крок, 2022. – 212 с.

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-2-3-11

Specialty G1(161). U.D.C. 662.73:662.74

STUDY OF COKING COAL PROPERTIES FOR DEVELOPMENT OF A RATIONAL SCHEME FOR ITS PREPARATION

© I.V. Shulga¹, Yu.V. Teleshev²

STATE ENTERPRISE "UKRAINIAN STATE RESEARCH INSTITUTE FOR CARBOCHEMISTRY (UKHIN)", 61023, Kharkiv, 7 Vesnina St., Ukraine

¹ Shulga Igor Volodymyrovych, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Head of the Coke Department, ORCID: 0009-0007-8677-9180, Scopus ID: 59473856500, e-mail: ko@ukhin.org.ua

² Teleshev Yuriy Volodymyrovych, Ph.D. in Technical Sciences, Scopus ID: 6602924103, e-mail: 196112juv@gmail.com

Coke-chemical enterprises use coal of various grades, which comes from a large number of suppliers. Therefore, at one of the leading coke-chemical enterprises of Ukraine, representative samples of coal included in its raw material base were selected, their granulometric composition and technological properties of size classes were studied. It was confirmed that the level of coal grinding has a significant impact on the technological properties of the coal charge. The most valuable from this point of view in petrographically homogeneous coal are size classes of 3-0.5 mm. Coarser grains have a smaller specific surface area, which does not allow them to take an active part in the surface heterogeneous interaction with other components of the coal backfill at the stages of sintering and coke formation. On the contrary, regrinding of coal grains leads to the phenomenon of so-called "self-degradation", as a result of which the realization of the sintering potential inherent in coal and charges is complicated. Petrographically heterogeneous coal has an even more complex and ambiguous dependence of technological properties on the degree of grinding, which requires special studies in each specific case. In addition, excessive grinding of coal leads to an increase in the number of solid particles carried away by the gases of the charge from the coking chamber to the gas collecting main, as a result of which the yield of fines increases and the quality of the tar deteriorates in terms of density and content of insoluble substances. Finally, excessive regrinding of coal leads to unproductive electricity consumption. With an insufficient degree of grinding of the charge, the operating conditions of coke ovens also deteriorate: the uniformity of heating of the coal charge deteriorates, the coke pushing force increases, and the quality of coke deteriorates.

Keywords: coke-chemical production; coal; coal preparation; coal charge; grinding; optimal size; coke quality.

Corresponding author: I.V. Shulga, e-mail: ko@ukhin.org.ua

Manuscript received 2026/02/18

Accepted for publication 2026/03/30

Published 2026/04/17

This article is licensed under a CC BY 4.0 license

КІНЕТИКА ДЕЕМУЛЬГАЦІЇ ВОДО-ОЛИВНИХ СИСТЕМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РЕАГЕНТІВ НА ОСНОВІ ЕСТЕРІВ ГУМІНОВИХ КИСЛОТ© В.В. Савченко¹*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна*К.О. Дорошенко²*ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)», 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна*¹ Савченко Віталій Володимирович, аспірант кафедри технології переробки нафти, газу і твердого палива, ORCID: 0009-0006-0333-1253, e-mail: korbinity@gmail.com² Дорошенко Кристина Олександрівна, мол. наук. співр. хімічного відділу, ORCID: 0009-0005-1683-4346, e-mail: ho@ukhin.org.ua

У статті обґрунтовано актуальність розробки нових деемульгаторів, адаптованих до природи емульсій. Як перспективну альтернативу традиційним реагентам запропоновано та випробувано складні естери на основі гумінових кислот. У статті представлено результати дослідження кінетики руйнування стійких водо-оливних емульсій типу «вода в оліві» із використанням нового деемульгатора на основі естерів гумінових кислот (реагент «Е») у порівнянні з промисловим блок-кополімерним еталоном «ПМ-1441». Модельні емульсії були стабілізовані вугільним концентратом, що забезпечувало високу агрегативну стійкість. Методом оптичної мікроскопії та аналізу цифрових зображень досліджено динаміку зміни питомої міжфазної поверхні у часі. Підтверджено існуючі погляди, що процес деемульгації проходить три послідовні стадії: коалесценцію, формування кластерів та утворення дренажних каналів. Розрахунок констант швидкості за рівняннями першого порядку показав, що реагент «Е» на початковій стадії забезпечує вищу швидкість коалесценції ($k = 0,0526$). Виявлено, що використання «ПМ-1441» супроводжується утворенням вторинної фракції наддрібних крапель, які не піддаються швидкому злиттю, що не було враховано у оцінці параметрів коалесценції. Попри високу початкову швидкість дії нового реагенту, у роботі підкреслено, що інтенсивна кінетика на перших етапах не є вичерпним показником загальної технологічної ефективності, оскільки «швидкі» деемульгатори часто обмежуються лише первинною дестабілізацією системи. Отримані дані є базою для подальшої оптимізації складу гумінових реагентів з метою досягнення максимальної глибини зневоднення важкої вуглеводневої сировини.

Ключові слова: кінетика, коалесценція, емульсія, нафтові продукти, продукти коксування, мікроскопія.

Автор для листування В.В. Савченко, e-mail: korbinity@gmail.com

Рукопис надійшов до редакції 26.02.2026

Прийнято до публікації 30.03.2026

Опубліковано 17.04.2026 Ця стаття ліцензується відповідно до міжнародної ліцензії CC BY 4.0

Деемульгація нафтових та кам'яновугільних стійких емульсій представляє собою процес, під час якого дисперсні краплі водної фази зливаються та відокремлюються від органічної фази. Важливим методом дослідження цього процесу є визначення швидкості коалесценції крапель та подальшого розділення фаз під впливом деемульгаторів. Існує значна кількість досліджень, в яких за допомогою мікроскопії спостерігають розміри крапель та характер руйнування емульсії [1-4].

Більшість дослідників виділяють наступні етапи руйнування емульсій типу «вода в оліві». Спочатку краплі води зближуються, утворюючи агрегати (флокули), при цьому міжфазна плівка залишається цілісною. Далі оливна фаза витісняється з простору між краплями, і відбувається дренавання плівки. Це призводить до її розриву, після чого краплі зливаються у більші, настає коалесценція. Укрупнені краплі спливають або седиментують під дією гравітації.

Таким чином, під час дослідження кінетики деемульгації виділяють три основні стадії: флокуляцію (агрегацію), витіснення бронюючої міжфазної плівки та коалесценцію крапель води [5]. Аналіз розподілу крапель за розмірами під час дослідження кінетики деемульгації ускладнюється поєднанням кількох процесів: впливом складу емульсії на міцність міжфазної плівки, а також явищем дозрівання Оствальда (зростання великих крапель за рахунок дифузійного розчинення дрібних) [6].

Кінетичні дослідження процесів деемульгації «вода у маслі» проводяться за допомогою різних методів: вимірюванням швидкості осаду крапель за законом Стокса [1], візуальним спостереженням за динамікою розділення шарів (bottle test) та мікроскопічним аналізом еволюції розмірів крапель у часі [7].

На основі кінетичних досліджень встановлюється порядок реакції залежно від чинників процесу [8]. Проте аналіз літературних даних свідчить, що вирішальним фактором, який найбільше впливає на константу швидкості (k) деемульсації, є природа самого деемульгатора. Найбільш ефективними реагентами є етиленоксид (ЕО) – пропиленоксид (ПО) блок-кополімери [9].

Для руйнування емульсії на основі кам'яновугільної смоли широко застосовується деемульгатор саме на основі ЕО/ПО блок-кополімерів – ПМ-1441 [10]. Але кам'яновугільна смола та оливи на її основі мають особливі фізико-хімічні властивості через складний вуглеводневий склад. Присутність гетероатомів та дисперсних домішок також впливають на емульгування, властивості плівки та ефективність дії деемульгаторів [11-13]. Тому актуальною є розробка нових

типів реагентів для зневоднення емульсій залежно від природи дисперсійного середовища. Зокрема, як перспективний тип деемульгаторів було випробувано складні ефіри на основі гумінових кислот [14-15].

Завданням роботи було дослідити кінетику дії нового деемульгатора на основі естерів гумінових кислот (умовна назва – деемульгатор Е) та зіставити її з показниками промислового деемульгатора на основі блок-кополімерів оксидів етилену та пропілену (ПМ-1441).

Для оцінки деемульгуювальної спроможності синтезованого реагенту було змодельовано водо-оливну систему. Як дисперсійне середовище використано кам'яновугільну вбирну оливу, а як дисперсну фазу – дистильовану воду. Компоненти змішували у рівному об'ємному співвідношенні (1:1). Для забезпечення агрегативної стійкості до системи додавали 0,5 % мас. порошкоподібного концентрату вугілля марки «Г».

Отримання емульсії з тривалою седиментаційною стабільністю здійснювали шляхом обробки суміші у високошвидкісному гомогенізаторі протягом 10 хвилин. Ефективність нового деемульгатора «Е» та промислового реагента «ПМ-1441» порівнювали за ідентичних умов: у кожному досліді реагенти вводили у формі 5 % розчину з питомою витратою 400 г/т емульсії. Для визначення швидкості руйнування емульсії застосовували мікроскоп Neophot із подальшим аналізом зображень у програмі TourView.

На рис. 1 наведено результати підрахунку кількості крапель емульсії «вода в оливі» за мікрофотознімками залежно від часу після додавання деемульгаторів «Е» та «ПМ-1441».

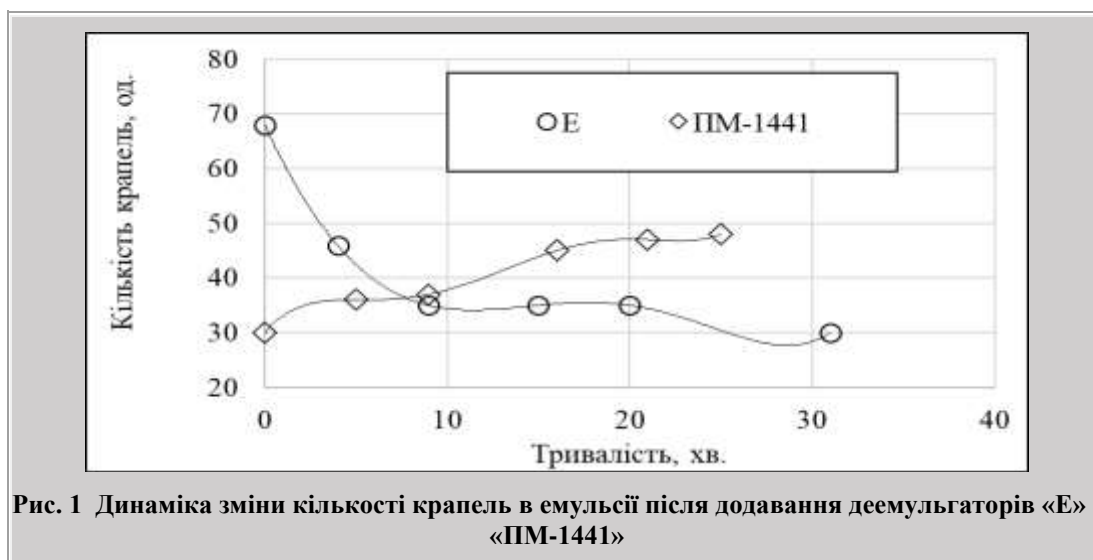


Рис. 1 Динаміка зміни кількості крапель в емульсії після додавання деемульгаторів «Е» і «ПМ-1441»

Представлена залежність вказує на те, що динаміка зменшення кількості крапель у часі має специфічний

характер для кожного деемульгатора. Така розбіжність обумовлена відмінностями у механізмах руйнування

міжфазних оболонок реагентами «Е» та «ПМ-1441». Зростання кількості крапель в емульсії після додавання деемульгатору «ПМ-1441» свідчить про переважну флокуляцію без повного злиття крапель. Реагент «Е» спричиняє інтенсивне злиття крапель із формуванням великих доменів дисперсної фази.

Оцінку ефективності проводили за швидкістю коалесценції. Слід зазначити, що при використанні деемульгатора «ПМ-1441» до розрахунку включали лише ті краплі, взаємодія котрих призводила до коалесценції, що дозволило об'єктивно порівняти кінетичні параметри процесів.

На основі даних про кількість крапель було розраховано площу $Ai(t)$ та еквівалентний діаметр за формулою:

$$d_{eqi} = \sqrt{\frac{4Ai(t)}{\pi}}, \quad (1)$$

об'єм краплі:

$$V = (4/3) \times \pi \times (d_{eqi}/2)^3, \quad (2)$$

площу поверхні краплі:

$$S = 4 \times \pi \times (d_{eqi}/2)^2, \quad (3)$$

Питому міжфазну поверхню (S , $\text{см}^2/\text{г}$) визначали як відношення сумарної площі поверхні крапель до їхньої загальної маси.

Результати підрахунку параметрів наведено у табл. 1-2.

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку кінетичних характеристик деемульсації реагентом «Е»

Параметри	Тривалість, хв.					
	0	4	9	15	20	31
Еквівалентний діаметр, мкм	153	251	335	365	366	437
Об'єм краплі, см^3	$1,9 \times 10^{-6}$	$8,3 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-5}$	$4,4 \times 10^{-5}$
Поверхня краплі, см^2	0,001	0,002	0,004	0,004	0,004	0,006
Питома міжфазна поверхня, S , $\text{см}^2/\text{г}$	391,6	239,1	179,0	164,4	163,9	137,3
$\log S$	2,59	2,38	2,25	2,22	2,21	2,14

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку кінетичних характеристик деемульсації реагентом «ПМ-1441»

Параметри	Тривалість, хв.					
	0	5	9	16	21	25
Еквівалентний діаметр, мкм	595	717	816	849	856	880
Об'єм краплі, см^3	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-4}$
Поверхня краплі, см^2	0,011	0,016	0,021	0,023	0,023	0,024
Питома міжфазна поверхня, S , $\text{см}^2/\text{г}$	100,9	83,7	73,5	70,7	70,1	68,2
$\lg S$	2,00	1,92	1,87	1,85	1,85	1,83

Для аналізу кінетики процесу коалесценції було побудовано залежність питомої міжфазної поверхні крапель води від часу, що відображено на рис. 2-3.

Отримані криві можна розділити на три окремі лінійні ділянки, кожна з яких відповідає кінетичному рівнянню першого порядку [16]:

$$\lg S = -kt + c, \quad (4)$$

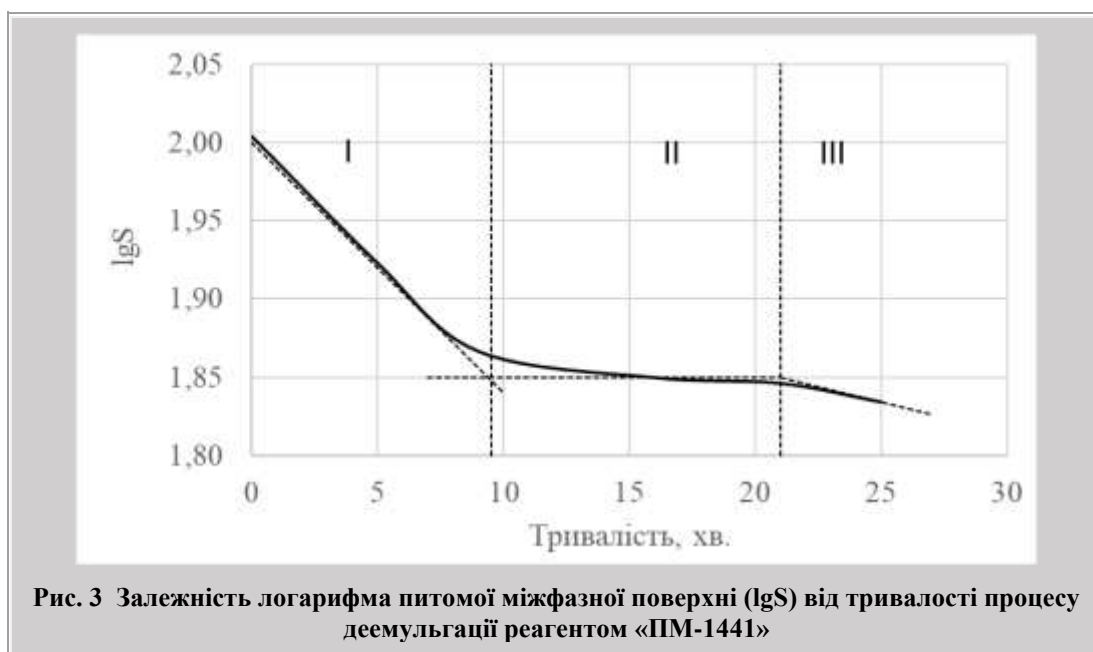
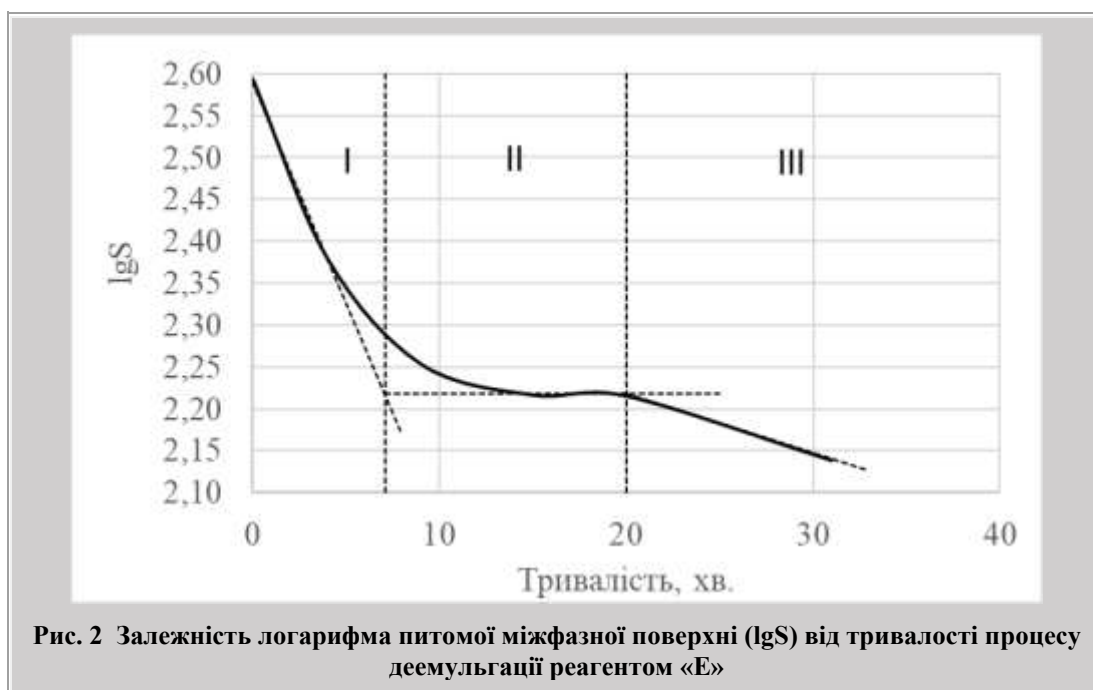
де S – питома міжфазна поверхня на один грам дисперсної фази ($\text{см}^2/\text{г}$); t – тривалість розділення фаз; c – константа; k – тангенс кута нахилу лінійного відрізка, що відображає швидкість коалесценції протягом певного періоду:

$$k = d(\lg S)/dt. \quad (5)$$

Результати розрахунку кінетичних параметрів процесу коалесценції наведено у табл. 3.

Відповідно до наявних досліджень [17], на рис. 2–3 можна виділити три етапи процесу руйнування емульсії: I – стадія коалесценції, II – формування кластерів, III – утворення каналів.

Новий деемульгатор «Е» демонструє значно вищу активність на першому етапі руйнування емульсії. Швидкість коалесценції для нього у 3,3 рази перевищує аналогічний показник традиційного реагенту «ПМ-1441». Це свідчить про здатність реагенту «Е» швидше дестабілізувати міжфазні плівки безпосередньо після введення.



Реагент «Е» прискорює перехід між стадіями: перша стадія завершується швидше. Це вказує на інтенсивнішу динаміку початкового злиття крапель. На другій стадії для обох реагентів $k = 0$, що характерно для етапу формування кластерів або агрегатів, де активне злиття крапель тимчасово призупиняється, а система перегрупується. На етапі формування каналів та остаточного розділення фаз реагент «Е» також випереджає аналог,

що забезпечує глибший ступінь зневоднення на завершальному етапі.

Синтезований деемульгатор «Е» переважає традиційний аналог «ПМ-1441» на всіх активних етапах коалесценції. Високі значення вільного члена в рівняннях апроксимації для реагенту «Е» також вказує на більшу вихідну міжфазну поверхню, яку реагент здатний ефективно обробляти.

Варто зауважити, що при використанні деемульгатора «ПМ-1441», окрім процесу коалесценції, спостерігалось утворення дрібніших крапель, при цьому кількість крапель при спостереженні зростала (рис. 1).

Оскільки метою цієї роботи було вивчення кінетики злиття основної маси дисперсної фази, зазначена дрібнодисперсна фракція не враховувалася, що впливає на загальну оцінку ефективності деемульгаторів.

Таблиця 3

Зіставлення кінетичних характеристик та констант швидкості коалесценції за присутності деемульгаторів «Е» та «ПМ-1441»

Параметри	Реагент	Стадія		
		I	II	III
Тривалість, хв.	Е	<7,1	<20	>20
	ПМ	<9,5	<21	>21
Лінійна апроксимація	Е	$\lg S = -0,0526t + 2,5905$	$\lg S = 2,218$	$\lg S = -0,0071t + 2,3598$
	ПМ	$\lg S = -0,0163t + 2,0$	$\lg S = 1,850$	$\lg S = -0,004t + 1,934$
Швидкість коалесценції, k	Е	0,0526	0	0,0071
	ПМ	0,016	0	0,004

Крім того, слід підкреслити, що висока швидкість дії деемульгатора на початкових етапах не є однозначним показником його загальної технологічної ефективності. У практиці підготовки нафти часто спостерігається закономірність, за якої «швидкі» реагенти не забезпечують високого підсумкового ступеня зневоднення через передчасне вичерпання їхньої активності або нездатність впливати на найдрібніші краплі. Тому подальша оцінка реагенту «Е» повинна включати аналіз залишкового вмісту вологи після завершення всіх стадій процесу».

Висновки

1. Аналіз кінетичних параметрів підтверджує високу деемульгувальну здатність синтезованого реагенту «Е». Встановлено, що на початковій стадії руйнування емульсії (Стадія I) швидкість коалесценції крапель під дією естерів гумінових кислот забезпечує оперативне зниження агрегативної стійкості системи.

2. Скорочення тривалості першого етапу свідчить про інтенсивнішу взаємодію реагенту «Е» з адсорбційними шарами стабілізатора. Нульові значення константи швидкості на другій стадії для обох реагентів корелюють із теоретичною моделлю формування кластерів, коли основний процес злиття замінюється просторовим перегрупуванням частинок. На заключному етапі (Стадія III) реагент «Е» також продемонстрував високу швидкість формування дренажних каналів, що в цілому вказує на його перспективність для інтенсифікації процесів підготовки важкої вуглеводневої сировини.

3. Інтенсивна кінетика на перших етапах руйнування емульсії не є вичерпним показником загальної технологічної ефективності, оскільки «швидкі» деемульгатори часто обмежуються лише первинною дестабілізацією системи. Отримані дані є базою для подальшої оптимізації складу гумінових реагентів з метою досяг-

нення максимальної глибини зневоднення важкої вуглеводневої сировини.

Бібліографічний список

1. Sarmas-Farfan J. Demulsification Kinetics of Water-in-Oil Emulsions of Ecuadorian Crude Oil: Influence of Temperature and Salinity / J. Sarmas-Farfan, A. Diaz-Barrios, T.E. Lehmann, V. Alvarado // *Energies*. – 2025. – No. 18. – P. 3115. <https://doi.org/10.3390/en18123115>.
2. Krebs T. Separation kinetics of an oil-in-water emulsion under enhanced gravity / T. Krebs, C.G.P.H. Schroen, R.M. Boom // *Chemical Engineering Science*. – 2012. – Vol. 71. – P. 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.10.057>.
3. Krebs T. A microfluidic method to study demulsification kinetics / T. Krebs, C.G.P.H. Schroen, R.M. Boom // *Lab on a Chip*. – 2012. – Vol. 12. – P. 1060–1070. <https://doi.org/10.1039/C2LC20930F>.
4. Elizalde B. E. Kinetics of demulsification of food protein-stabilized oil-in-water emulsions / B. E. Elizalde, A. M. R. Pilosof, L. Dimier [et al.] // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. – 1989. – Vol. 66. – P. 1454–1458. <https://doi.org/10.1007/BF02661970>.
5. Raya S. A. A critical review of development and demulsification mechanisms of crude oil emulsion in the petroleum industry / S. A. Raya, I. Mohd Saaid, A. Abbas Ahmed [et al.] // *The Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2020. – Vol. 10. – P. 1711–1728. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00830-7>.
6. Taylor P. Ostwald ripening in emulsions / P. Taylor // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 1998. – Vol. 75. – Iss. 2. – P. 107–163. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(98\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(98)00035-9).
7. Adeyemi B. J. Investigating the kinetics of water-in-crude oil emulsion stability / B. J. Adeyemi, A. A. Sulai-

mon // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2015. – Vol. 10. – No. 16. – P. 7131–7136.

8. Liu J. Study on the kinetics of formation process of emulsion of heavy oil and its functional group components / J. Liu, C. Sun, Z. Lun [et al.] // *Sci Rep.* – 2024. – Vol. 14. – P. 8916. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59637-9>.

9. Niu Z. Changing the interface between an asphaltene model compound and water by addition of an EO–PO demulsifier through adsorption competition or adsorption replacement / Z. Niu, T. Yue, X. He, R. Manica // *Energy Fuels*. – 2019. – Vol. 33. – P. 5035–5042. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00741>.

10. Topilnytskyy P. Demulsifying compositions for destruction of water coal tar emulsions / P. Topilnytskyy, V. Romanchuk, L. Bannikov [et al.] // *Petroleum Science and Technology*. – 2024. – Vol. 42. – P. 1820–1840. <https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2150776>.

11. Zander M. Aspects of coal tar chemistry. A review / M. Zander // *Polycyclic aromatic compounds*. – 1995. – Vol. 7. – No. 4. – P. 209–221. <https://doi.org/10.1080/10406639508009625>.

12. Банніков Л. П. Характеристика емульсій «вода в кам'яновугільній смолі», стабілізованих пилоподібною

вугільною речовиною / Л. П. Банніков // *Вуглехімічний журнал*. – 2023. – № 1. – С. 11–17. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-1-11-17>.

13. Банніков Л. П. Оцінка полярності стабілізаторів емульсій на основі кам'яновугільної смоли / Л. П. Банніков // *Вуглехімічний журнал*. – 2022. – № 5. – С. 15–22. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2022-0-5-15-25>.

14. Банніков Л. П. Хімічні властивості та характеристики поверхневої активності гумінової кислоти з бурого вугілля / Л. П. Банніков, В. В. Савченко // *Вуглехімічний журнал*. – 2024. – № 3. – С. 28–35. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2024-0-3-35-40>.

15. Савченко В. В. Деемульгатори з бурого вугілля: синтез, властивості, застосування / В. В. Савченко, Л. П. Банніков // Сучасні технології переробки паливних копалин : тези доп. 8-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 16–17 квітня 2025 р.). – Харків: НТУ "ХПІ". – 2025. – С. 67–70.

16. Al-Sabagh A. M. Investigation of kinetics and rheological properties for the demulsification process / A. M. Al-Sabagh, N. M. Nasser, T. M. Abd El-Hamid // *Egyptian Journal of Petroleum*. – 2013. – Vol. 22. – P. 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2012.11.013>.

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-2-12-18

Specialty G1(161). U.D.C. 662.7

KINETICS OF DEMULGATION OF WATER-OIL SYSTEMS USING REAGENTS BASED ON HUMIC ACID ESTERS

© V.V. Savchenko¹

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 61002, Kharkiv, 2 Kirpichova St., Ukraine

K.O. Doroshenko²

STATE ENTERPRISE "UKRAINIAN STATE RESEARCH INSTITUTE FOR CARBOCHEMISTRY (UKHIN)", 61023, Kharkiv, 7 Vesnina St., Ukraine

¹ Savchenko Vitalii Volodymyrovich, Postgraduate Student of the Department of Oil, Gas and Solid Fuel Processing Technologies, ORCID: 0009-0006-0333-1253, e-mail: korbinity@gmail.com

³ Doroshenko Kristina Olexadrivna, junior researcher of the Chemical Department, ORCID: 0009-0005-1683-4346, e-mail: xo@ukhin.org.ua

The relevance of developing new demulsifiers adapted to the nature of the dispersion medium is justified. Complex esters based on humic acids have been proposed and tested as a promising alternative to traditional reagents. The article presents the results of a study of the kinetics of destruction of stable water-in-oil emulsions using a new demulsifier based on humic acid esters (reagent "E") in comparison with the industrial block copolymer standard "PM-1441". The model systems were stabilized with coal concentrate, which ensured high aggregate stability. The dynamics of changes in the specific interphase surface over time were studied using optical microscopy and image analysis software. It has been established that the demulsification process undergoes three consecutive stages: coalescence, cluster formation, and drainage channel formation. Calculation of the rate constants using first-order equations showed that reagent "E" provides a higher coalescence rate ($k = 0.0526$) at the initial stage. It was found that the use of "PM-1441" is accompanied by the formation of a secondary fraction of ultra-fine droplets that do not undergo rapid coalescence, which was not taken into account in the assessment of coalescence parameters. Despite the high initial rate

of action of the new reagent, the paper emphasizes that intensive kinetics in the early stages is not an exhaustive indicator of overall technological efficiency, since “fast” demulsifiers are often limited to only primary destabilization of the system. The data obtained form the basis for further optimization of the composition of humic reagents in order to achieve maximum dehydration depth of heavy hydrocarbon raw materials.

Keywords: kinetics, coalescence, emulsion, petroleum products, coking products, microscopy.

Corresponding author: K.O. Doroshenko, e-mail: ko@ukhin.org.ua

Manuscript received 2026/02/26

Accepted for publication 2026/03/30

Published 2026/04/17

This article is licensed under a CC BY 4.0 license

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-2-18-28

Спеціальність G1(161). УДК 338.432:620.925

ЗАЛУЧЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ВІДХОДІВ ЯК АЛЬТЕРНАТИВИ НАФТОВІЙ ТА КОКСОХІМІЧНІЙ СИРОВИНІ У ВИРОБНИЦТВІ АВТОМОБІЛЬНИХ БЕНЗИНІВ

© К.В. Шевченко¹, А.Б. Григоров²

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна

¹ Шевченко Кирило Володимирович, Ph.D. (техн. науки), докторант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива (ТПНГ та ТП), ORCID: 0000-0002-4819-4663, Scopus ID: 57221911422, e-mail: drekstar2007@gmail.com

² Григоров Андрій Борисович, докт. техн. наук, проф., проф. кафедри ТПНГ та ТП, ORCID: 0000-0001-5370-7016, Scopus ID: 55894206900, e-mail: grigorovandrey@ukr.net

В статті розглянуто можливості залучення сільськогосподарських відходів як альтернативи нафтовій та коксохімічній сировині для виробництва компонентів автомобільних бензинів в Україні. Проаналізовано ресурсний потенціал біомаси, зокрема соломи зернових культур, кукурудзяних решток, лушпиння та інших лігно-целюлозних відходів, які можуть бути ефективно використані як джерело вуглеводнів для отримання моторних палив, зокрема автомобільних бензинів. Встановлено, що ключовим етапом є підготовка сировини, яка включає сортування, очищення, подрібнення, сушіння та грануляцію, що забезпечує однорідність і підвищує ефективність подальших процесів. Особливу увагу приділено методам активації біомаси, зокрема паровій обробці, яка сприяє руйнуванню лігноцелюлозної структури та підвищує доступність полісахаридів для гідролізу. Розглянуто два напрямки переробки біомаси – сільськогосподарських відходів. Один поєднує газифікацію, синтез Фішера – Тропша та каталітичну модифікацію, інший – гідроліз і ферментацію. Перший дозволяє перетворити біомасу на алклати (RON: 92–98 од.; MON: 84–89 од.), ізомерізати (RON: 82–92 од.; MON: 80–82 од.), каталізати (RON: 90–98 од.; MON: 82–85 од.) та риформати (RON: 95–100 од.; MON: 85–88 од.). Другий дозволяє отримувати спирти – етанол (RON= 108–109; MON = 88–90), бутанол (RON= 94–96; MON = 78–82) – із високими виходами (для етанолу: 85–95 %; для бутанолу: 60–65 %). Наведено технологічні особливості розділення та очищення продуктів ферментації. Показано, що отримані спирти можуть бути використані як безпосередні компоненти бензину або як сировина для подальшого синтезу вуглеводнів. Обґрунтовано необхідність стадій очищення та доведення продуктів, включаючи осушування, гідродесульфуризацію та адсорбційну очистку, що забезпечують відповідність сучасним екологічним і експлуатаційним вимогам до автомобільних бензинів. Зроблено висновок, що комплексне поєднання процесів підготовки, активації та переробки біомаси дозволяє створити ефективну технологію виробництва компонентів автомобільних бензинів із відновлюваної сировини, що є перспективним напрямом для підвищення енергетичної незалежності та екологічної безпеки України.

Ключові слова: сільськогосподарські відходи; біомаса; нафтова та коксохімічна сировина; автомобільний бензин; газифікація; синтез; каталітична модифікація; гідроліз; ферментація; етанол; бутанол.

Автор для листування А.Б. Григоров, e-mail: grigorovandrey@ukr.net

Рукопис надійшов до редакції 20.02.2026

Прийнято до публікації 30.03.2026

Опубліковано 17.04.2026 Ця стаття ліцензується відповідно до міжнародної ліцензії CC BY 4.0

Україна є аграрною державою з великими обсягами сільськогосподарського виробництва, яка здатна щорічно генерувати великі масиви (близько 9–10 млн тон нафтового еквіваленту [1]) різних аграрних відходів – соломі, стебла, лушпиння, кукурудзяні качани тощо. Значна залежність від імпортованих енергоносіїв, зокрема автомобільних бензинів, створює ризики енергетичної безпеки, особливо в умовах воєнного часу та геополітичної невизначеності. Разом з тим, використання аграрних відходів як альтернативи нафтовій та коксохімічній сировині для виробництва моторного палива вважається шляхом до енергетичної незалежності, зменшення імпорту нафтопродуктів і посилення місцевої економіки.

Перспективність розбудови цього напрямку для України полягає в наступному:

1. Сталий розвиток – інтеграція біопаливної індустрії у національну енергетичну систему, яка сприяє зеленій трансформації економіки України;
2. Скорочення спалювання аграрних відходів на полях, що позитивно впливає на повітря, ґрунти та водні ресурси;
3. Створення нових робочих місць у сфері збору, транспортування, переробки і виробництва біопалив;
4. Економічна ефективність, що зумовлена додатковими доходами для фермерів від реалізації сировини та співпраці з біоенергетичними підприємствами.

Сільськогосподарські відходи представляють собою біомасу, яка складається з трьох основних компонентів [2, 3]: 35–45 % целюлози (полімер глюкози; джерело алкільних і насичених вуглеводнів при розкладанні, які можуть бути перетворені на октанопідвищуючі компоненти); 20–30 % геміцелюлози (ацетильовані полісахариди – пентози і гексози; менш кристалічна, легко гідролізується та утворює кислоти і леткі продукти при піролізі; забезпечує легко-розчинні та леткі вуглеводні, що підвищують придатність сировини до синтезу бензинових фракцій); 15–25 % лігніну (ароматичний полімер, стабільний при високих температурах та забезпечує тверду фракцію при піролізі; джерело ароматичних компонентів, які є необхідними для підвищення октанового числа і поліпшення властивостей готового бензину). Додаткові компоненти – 10 % мінеральної золи (Si, K, Ca, Mg, P, які залишаються після спалювання; можуть формувати шлаки або каталізувати побічні реакції, тому потрібна попередня очистка і сепарація) та до 15 % вологи (залежить від сезону та умов зберігання; негативно впливає на енергетичну щільність і ефективність піролізу).

Отже, завдяки своєму хімічному складу, у сукупності, аграрні відходи формують універсальну сировину – альтернативу нафтовій та коксохімічній, яка після технологічної переробки може перетворюватися на бензинові компоненти з високим октановим числом.

Переробка сільсько-господарських відходів в компоненти або товарні бензини представляє собою комплексний технологічний процес, який поєднує в собі три блоки: блок підготовки сировини, блок її безпосередньої переробки та блок очищення та доведення.

Блок підготовки сировини (див рис. 1) складається з наступних стадій: збір сировини; сортування і очистка; подрібнення та сушіння; пресування та грануляція.

Оптимальний час збору біомаси залежить від культури та вологості. Так, зернові культури доцільно збирати після обмолоту, коли вологість соломи $\leq 15\%$ [4, 5]. Кукурудзяні культури – після збирання зерна, коли стебла висохли, а олійні – після висушування лушпиння насіння. Причому, сезонність збору впливає на неперервність постачання сировини, тому потрібна система тимчасового зберігання. Методи збору біомаси поділяються на [6–8]: механічний збір (використання соломорізків, пресів та комбайнів з приставками для подрібнення і пресування відходів у тюки) та збирання після сільськогосподарських операцій. В першому випадку спостерігається висока швидкість, отримання стандартизованих тюків, що легко транспортувати, але цей метод потребує інвестицій у техніку, не завжди збирається вся біомаса. В другому – залишки після обмолоту або видалення качанів кукурудзи збирають спеціальними пристроями. Потребує мінімального додаткового оброблення, але частина домішок (ґрунт, каміння) потрапляє у сировину.

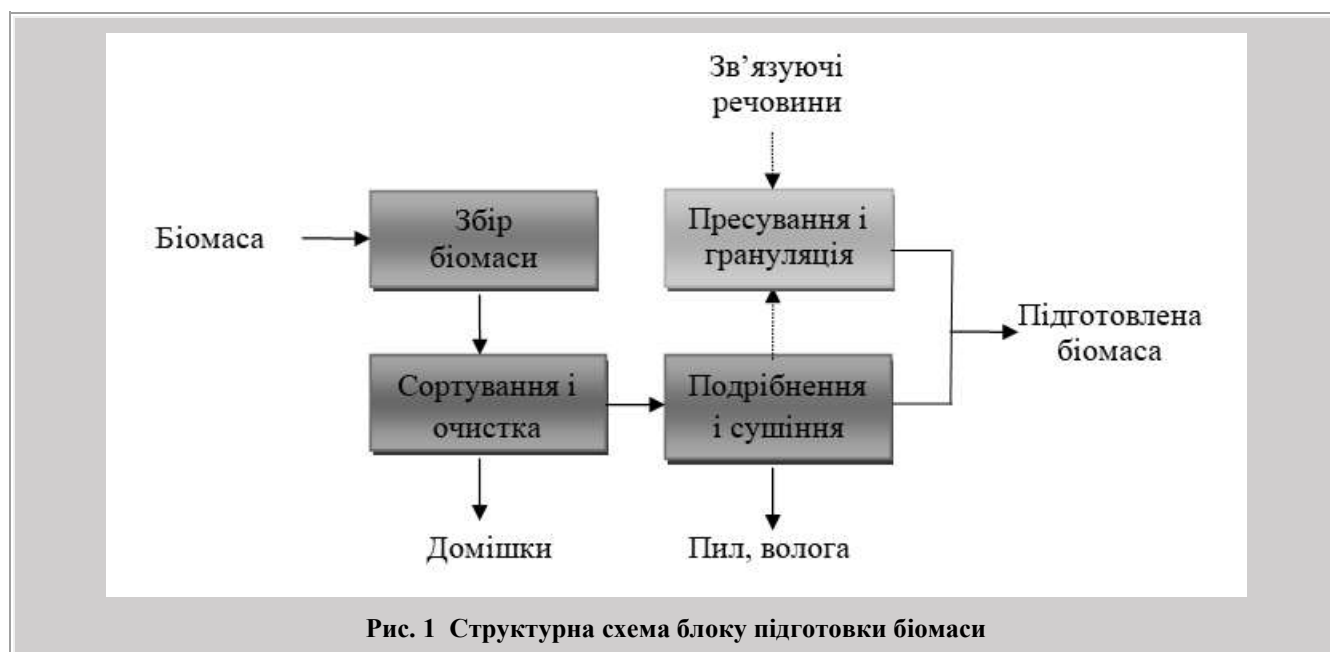


Рис. 1 Структурна схема блоку підготовки біомаси

Після збору біомаси необхідно провести її сортування та очищення, під час якого відокремлюють домішки [9, 10]: ґрунт, каміння, насіння бур'янів, залишки добрив. Сортування слід проводити до подрібнення та сушіння, що дозволяє уникнути забруднення дробильної техніки і сушарок, а також сприяє розділенню на великі та дрібні фракції для різних технологічних процесів. Сортування після подрібнення та сушіння слід розглядати як допоміжну операцію, яка застосовується для видалення дрібного сміття або пилу, що утворився при подрібненні. Для цього часто використовується гравітаційне, ситове або повітряне сепарування. Тобто основне сортування слід проводити перед підготовкою біомаси, а після подрібнення лише контрольну очистку, щоб гарантувати стабільність технологічного процесу.

Стадія подрібнення і сушіння дозволяє зменшити розмір частинок та вологості для підвищення ефективності подальшої переробки. Так, в деяких випадках здійснюють подрібнення біомаси безпосередньо на полі для полегшення транспортування та підвищення щільності. Загалом, подрібнення біомаси полегшує транспортування і зберігання сировини завдяки зменшенню об'єму. Подрібнену сировину легше пресувати в тюки. Також, подрібнення біомаси дозволяє збільшити площу її питомої поверхні, що підвищує швидкість реакцій, які протікають при переробці біомаси. Оптимальний розмір частинок біомаси в залежності від напрямку переробки (газифікація, піроліз) може сягати 50 мм, а для таких процесів як гідроліз і ферментація – коливатися в межах 1–5 мм [11–13]. Основні апарати, які мо-

жна використовувати для подрібнення біомаси – це ротаційні молоткові дробарки (швидко дроблять солому, стебла, кукурудзяні стебла) та ротаційні ножові подрібнювачі (забезпечують більшу рівномірність фракцій). Сушіння біомаси дозволяє зменшити вологість біомаси, тим самим підвищуючи її теплотворну здатність і виходу летких компонентів при піролізі або газифікації. При цьому, зменшується ризик бродіння, цвілі та гниття при зберіганні та транспортуванні. Оптимальна вологість біомаси для піролізу та газифікації, складає 5–15 % [14]. Хоча іноді використовується частково сушена або свіжозібрана біомаса (наприклад, для гідролізу і ферментації) [15]. Застосовують наступні методи сушіння: природне сушіння на полі (використання сонячної енергії є дешевим методом, але тривалість процесу суттєво залежить від погоди – досить важко контролювати рівень вологості); сушіння у сушарках (дозволяє контролювати температуру і вологість; це швидший і більш стабільний метод) та комбіноване сушіння (спочатку на полі, потім досушування у сушарках, що зменшує витрати енергії). Зазвичай, температура сушіння біомаси становить $\leq 60\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15], щоб не руйнувати полімери і не втратити леткі компоненти. В тих випадках, коли переробку підготовленої сировини проводять методом гідролізу і ферментації, стадія подрібнення і сушіння є заключною стадією процесу підготовки. Коли переробка підготовленої біомаси передбачає використання піролізу або газифікації вводиться додаткова стадія – пресування і грануляція.

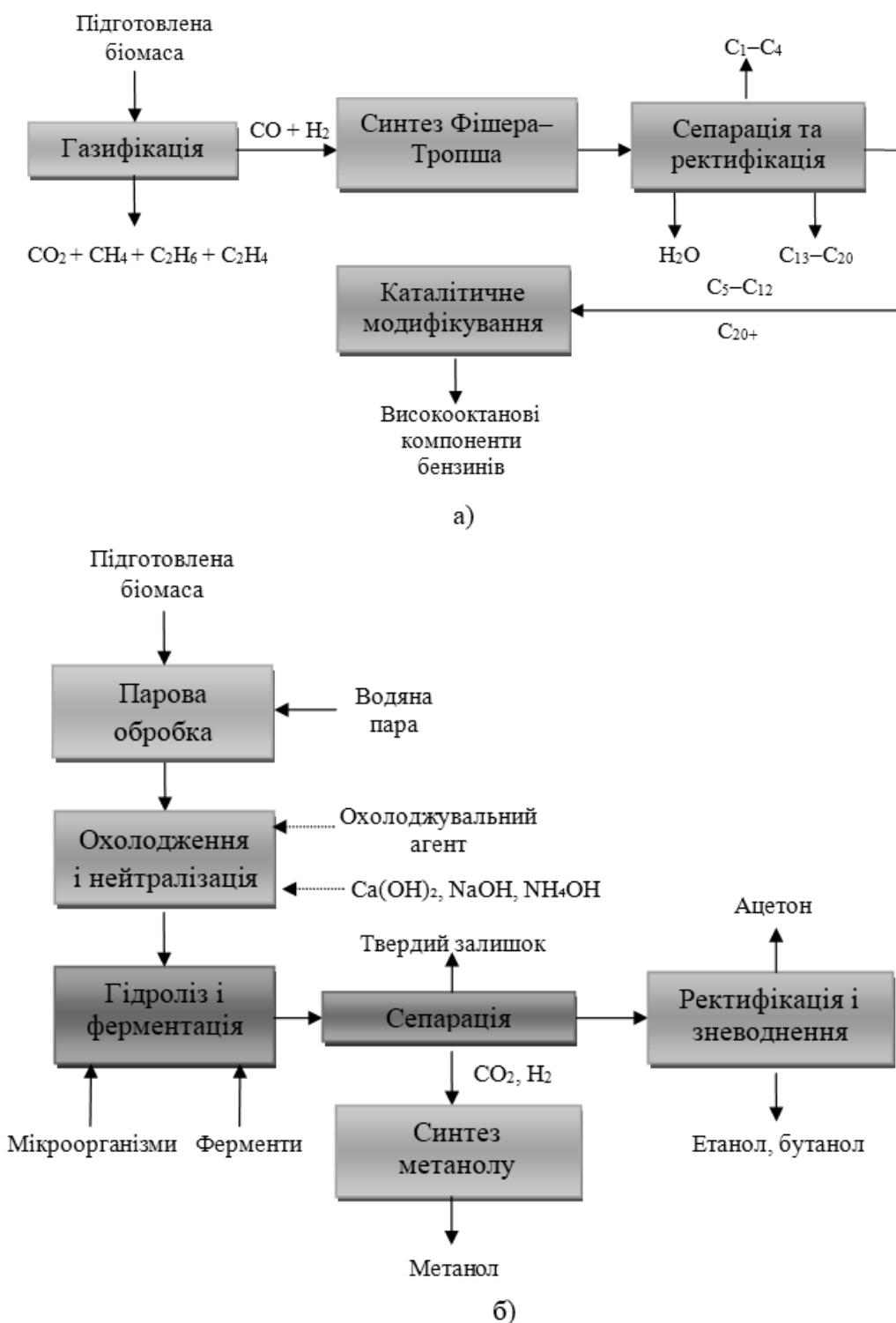


Рис. 2 Структурна схема блоку переробки підготовленої біомаси: а) напрям I; б) напрям II

Пресування та гранулювання після подрібнення дозволяє збільшити щільність біомаси, що полегшує її транспортування та зберігання. Створення стандартизованих форм-факторів (тюки, брикети, гранули) підвищує зручність подачі біомаси в реактор (піроліз, газифікація), мінімізує втрати через пил та висипання (покращує екологічність процесу); підвищує стабільність біомаси при її зберіганні (зменшення доступу кисню і розвитку цвілі). Для пресування використовують преси високого тиску (ротаційні, гвинтові, поршневі). Біомасу подають у прес у вигляді подрібнених і сушених фракцій. Під високим тиском (20–50 МПа) [16] біомасу спресовуєть у брикети (довжина: 20–100 см; діаметр: 5–15 см). При пресуванні структура целюлози склеюється природними компонентами лігніну, тому часто не потрібні додаткові зв'язуючі речовини. Натомість, гранулятори (роликіві, гвинтові) формують круглі або циліндричні гранули (довжина: 10–30 мм; діаметр: 6–12 мм), які мають однорідний розмір, що забезпечує стабільне горіння та піроліз, легке автоматичне транспортування та подачу у реактор, можливість фасування для промислових або локальних заводів. До числа факторів, що впливають на ефективність пресування та грануляції біомаси, слід віднести: вологість біомаси (оптимальна для пресування 10–15 %; занадто волога біомаса сприяє розсипанню брикетів, занадто суха ускладнює процес); розмір частинок після подрібнення (дуже великі погіршують пресування; надто дрібні сприяють утворенню пилу і блокуванню обладнання); температура і тиск (високий тиск сприяє склеюванню лігніну і підвищує міцність брикетів/гранул); використання додаткових зв'язуючих речовин (у разі низького вмісту лігніну додають крохмаль або біополімери).

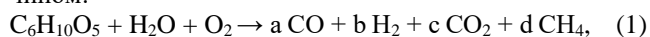
Блок переробки сировини може бути реалізований відповідно до одного з двох напрямків: термодеструктивна переробка з подальшою каталітичною модифікацією отриманих продуктів (див. рис. 2, а) та переробка шляхом гідролізу і ферментації (див. рис. 2, б).

Напрямок термодеструктивної переробки підготовленої біомаси складається з наступних стадій: газифікація; синтез Фішера-Тропша; каталітичне модифікування; пресування та грануляція.

Газифікацію підготовленої біомаси (соломи, стебелів, лушпиння тощо) слід вважати основним і універсальним методом її технологічної переробки в суміш газів ($\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{CH}_4$) – синтез-газ [17, 18]. Даний процес протікає у присутності обмеженої кількості окисника (повітря, кисню або водяної пари) при високих температурах (700–1000 °С).

Отриманий синтез-газ буде мати наступний компонентний склад: 20–40 % H_2 ; 20–30 % CO ; 10–15 % CO_2 ; 5–10 % CH_4 ; 10–50 % N_2 (при повітряній газифікації) та < 5 % низькомолекулярних вуглеводнів (C_2H_6 , C_2H_4). Чистота і співвідношення H_2/CO залежать від типу біомаси, температури, виду окисника і технології газифікації. Для синтезу бензину оптимальне відношення $\text{H}_2/\text{CO} \approx 2$ [19].

Основні хімічні реакції, що протікають при газифікації біомаси ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) можна представити наступним чином:



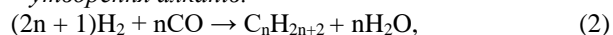
де a, b, c, d – коефіцієнти, які визначаються умовами газифікації (температура, вид окисника, $\text{H}_2\text{O}/\text{біомаса}$).

Технологічні параметри газифікації біомаси, які необхідно підтримувати для отримання синтез-газу, представлені в табл. 1.

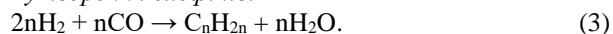
Отже, після розділення продуктів, утворений синтез-газ ($\text{CO} + \text{H}_2$) виступає універсальною сировиною для подальшого синтезу рідких вуглеводнів – основних компонентів для виробництва автомобільного бензину.

На наступній стадії виробництва реалізують синтез Фішера-Тропша, який дозволяє у присутності каталізатору (Fe, Co, Ru), перетворити виділений з суміші продуктів газифікації синтез-газ у парафінові, олефінові та частково ароматичні вуглеводні [20]:

– утворення алканів:



– утворення олефінів:



Основними вимогами до синтез-газу є наступні: співвідношення $\text{H}_2/\text{CO} \approx 2$ та мінімальний вміст домішок (H_2S , NH_3 , смоли), які виступають отрутою для каталізаторів.

Таблиця 1

Технологічні параметри газифікації біомаси

Параметр	Одиниці вимірювання	Числове значення
Температура	°С	700–1000
Тиск	МПа	0,1–3,0
Окисник	–	Повітря, кисень, водяна пара
Тривалість контакту	Сек.	1–5
Тип реактора	–	Рухомий шар, киплячий шар, трубчастий, ротаційний

Таблиця 2

Технологічні параметри синтезу Фішера-Тропша біомаси

Параметр	Одиниці вимірювання	Числове значення
Температура: <i>Низькотемпературний процес</i> <i>Високотемпературний процес</i>	°C	200–250 300–350
Тиск	МПа	1,0–4,0
Окисник	–	Повітря, кисень, водяна пара
Тривалість контакту: <i>Низькотемпературний процес</i> <i>Високотемпературний процес</i>	Сек.	10–60 1–10
Тип реактора	–	Трубчасті, з псевдозрідженим шаром, slurry-реактори

Технологічні параметри синтезу Фішера-Тропша при переробці біомаси, які необхідно підтримувати для отримання конверсії синтез-газу в рідкі вуглеводні, представлені в табл. 2.

Спрощений механізм реакцій, які протікають при синтезі Фішера-Тропша, можна представити наступним чином: адсорбція CO і H₂ на поверхні каталізатора; дисоціація CO → C* + O*; гідрування C → CH_x*; зростання вуглеводневого ланцюга; десорбція продуктів. Продукти реакцій мають широкий фракційний склад та наступний розподіл (закон Андерсона–Шульца–Флорі): гази (C₁–C₄); бензинова фракція (C₅–C₁₂); дизельна фракція (C₁₃–C₂₀); високомолекулярні фракції (C₂₀₊).

За хімічним складом виділені бензинові фракції складаються головним чином з n-парафінів, що зумовлює їх низьке октанове число [21]. Такі фракції можна використовувати як базові, замість стабільних прямогонних фракцій, отриманих на установках первинної переробки нафти або газового конденсату. Але їх більшість надходить на каталітичну модифікацію для отримання високооктанових компонентів бензину, у тому числі ароматичних вуглеводнів, аналогічних до тих, що отримують на коксохімічних підприємствах.

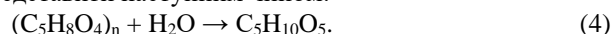
Стадія каталітичної модифікації передбачає використання технологій ізомеризації, риформінгу (для бензинової фракції C₅–C₁₂) та каталітичного крекінгу або гідрокрекінгу (для високомолекулярних фракцій C₂₀₊) [22, 23]. Ці процеси дозволяють отримати алкільати

(RON: 92–98 од.; MON: 84–89 од.), ізомерізати (RON: 82–92 од.; MON: 80–82 од.), каталізати (RON: 90–98 од.; MON: 82–85 од.) та риформати (RON: 95–100 од.; MON: 85–88 од.) [24].

Перевагами наведеної схеми переробки підготовленої біомаси є використання локальної сировини (аграрних відходів), зменшення імпорту нафтопродуктів, низький вміст сірки та ароматичних домішок у продуктах. Разом з цим, технологія має високу капіталомісткість, при її реалізації виникає необхідність глибокого очищення синтез-газу, а первинні продукти характеризуються низьким октановим числом.

Подолати означені недоліки можливо за рахунок використання переробки підготовленої біомаси шляхом гідролізу і ферментації (див. рис. 2, б). Запропонована схема передбачає попередню парову обробку підготовленої сировини в реакторі задля руйнування лігнінової матриці, розпушення і часткового розщеплення геміцелюлози, що сприяє підвищенню ефективності гідролізу, забезпечуючи більший вихід цукрів [25].

Так, часткову деградацію геміцелюлози можна представити наступним чином:



При цьому, лігнін стає більш аморфним, а целюлоза залишається стабільною.

Технологічні параметри парової обробки підготовленої біомаси, представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Технологічні параметри парової обробки підготовленої біомаси

Параметр	Одиниці вимірювання	Числове значення
Температура:	°C	160–220
Тиск	МПа	0,8–2,5
Вологість біомаси	%	30–50
Тривалість обробки	хв.	5–30
Тип реактора	–	Вертикальний або горизонтальний циліндричний реактор

Під час парової обробки в реактор з біомасою подається пар під високим тиском, що сприяє розпушенню структури. Далі відбувається стрімке скидання тиску, яке супроводжується механічним руйнуванням структури та підвищенням пористості матеріалу.

Після парової обробки біомаса має високу температуру – 160–220 °С, але гідроліз і ферментація відбуваються при значно нижчих температурах (< 50 °С). Тому наступною стадією процесу є охолодження активованої біомаси, яке запобігає денатурації ферментів. Охолодження реалізується як з використанням теплообмінників (пластинчасті, кожухотрубчасті), так і флеш-охолодженням (різке зниження тиску) або додаванням

холодної води. В тих випадках, коли для активації підготовленої біомаси використовують кислотну або лужну обробку, необхідно передбачати стадії нейтралізації активованої біомаси, оскільки вона має екстремальні значення рН (кислотна рН= 1–3; лужна рН=10–13). При цьому стадія ферментації проходить при рН = 4.5–6.5 [26]. Занадто високий рН та накопичення у біомасі солей (Na₂SO₄, CaSO₄) сприяє пригніченню ферментації. Досить часто як реагенти нейтралізації застосовують лужні агенти – Ca(OH)₂, NaOH, NH₄OH.

Технологічні параметри парової обробки підготовленої біомаси, представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Технологічні параметри нейтралізації активованої біомаси

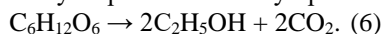
Параметр	Одиниці вимірювання	Числове значення
Температура	°С	30–60
рН після нейтралізації	–	4.8–5.5
Тривалість процесу	Хв.	10–60
Перемішування	–	інтенсивне
Тип реактора	–	Вертикальні реактори змішування

Наступною важливою стадією переробки активованої та охолодженої біомаси виступає її гідроліз і ферментація. Власне гідроліз біомаси – це процес розщеплення полісахаридів, які містяться в її складі, до простих цукрів.

Гідроліз целюлози – основного компоненту біомаси – протікає за наступною схемою:



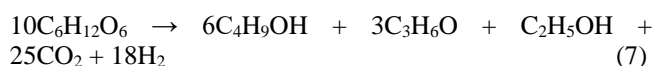
До методів гідролізу відносять кислотний (H₂SO₄) та ферментативний. При цьому, кислотний гідроліз є швидким, але утворює інгібітори (фурфурол, HMF), а ферментативний – більш селективний та енергетично вигідний. Так, ферментація цукрів або спиртового бродиння з утворенням етанолу протікає за схемою:



Вихід етанолу складає 85–95 % від теоретичного.

Для ферментації цукрів досить часто використовують такі мікроорганізми, як *Saccharomyces cerevisiae* [27] та генетично модифіковані бактерії [28].

Ацетон-бутанол-етанольна ферментація (АВЕ) протікає за схемою:



Продуктами реакції виступають: бутанол (RON= 94–96; MON = 78–82) та етанол (RON= 108–109; MON = 88–90) [29]–перспективні компоненти автомобільних бензинів; ацетон. Вихід бутанолу – 60–65 %, ацетону – 20–30 % та етанолу – 5–10 %.

Технологічні параметри парової обробки підготовленої біомаси, представлені в табл. 5.

Таблиця 5

Технологічні параметри гідролізу і ферментації біомаси

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення для параметру
Температура	°С	35–38
рН	–	4,5–5,0
Тривалість	Год.	48–72
Тверда фаза	%	15–25
Тип реактору	–	Спеціалізовані біореактори з інтенсивним перемішуванням

Власне процес гідролізу біомаси протікає під впливом (1600–20000 rpm від сухої біомаси) таких ферментів як: ендоглюканази (руйнують структуру целюлози);

екзоглюканази (утворюють целобіозу); β-глюкозидази (утворюють глюкозу); ксиланази (утворюють ксилозу); літичні полісахаридмонооксигенази (підсилюють гід-

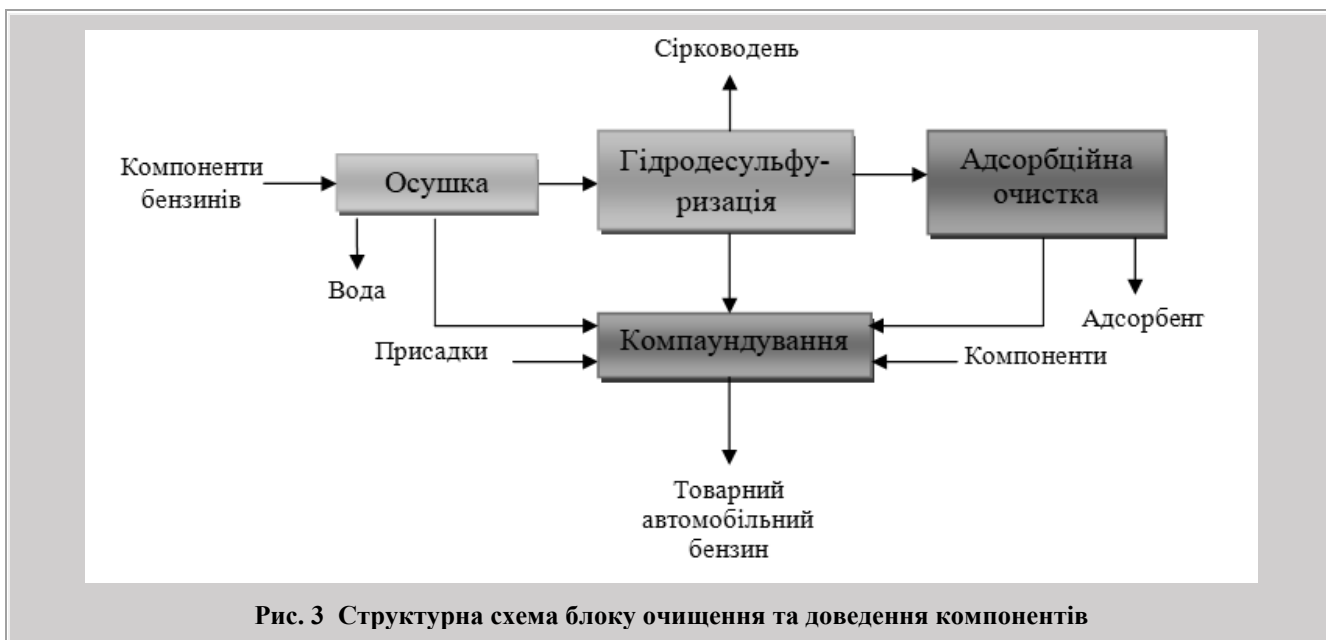
роліз) тощо. Процес ферментації протікає під впливом мікроорганізмів: дріжджі (*Saccharomyces cerevisiae*) для збільшеного виходу етанолу, бактерії (*Clostridium*) для збільшеного виходу бутанолу.

Поєднання процесу гідролізу і ферментації в одному апараті – реакторі, дозволяє оптимізувати процес за рахунок спрощення технологічної схеми, зниження металоємності та енергетичних витрат виробництва.

Стадія сепарації дозволяє відокремити від рідких цільових продуктів газу (CO_2 , H_2) та твердий залишок (лігнін та незреагована біомаса). Причому, газу можуть бути використані у промисловості (на стадії синтезу метанолу – компоненту автомобільного бензину (RON = 109 од.; MON = 92 од.) [30], а твердий залишок для отримання теплової енергії.

Стадія ректифікації і зневоднення дозволяє здійснити розділення суміші продуктів (етанол, бутанол, ізо-бутанол, ацетон) та відокремити воду. Таке відділення та концентрація необхідні для подальшого використання спиртів як компонентів автомобільного бензину. Враховуючи температури кипіння продуктів, які складають суміш (етанол – 78,3 °C; н-бутанол – 117,7 °C; і-бутанол – 108 °C; вода – 100 °C; ацетон – 56 °C) їх дистиляцію проводять в ректифікаційних колонах з кількістю теоретичних тарілок не менше 20 шт.

Блок очищення та доведення (див. рис. 3) призначений для очищення отриманих продуктів від домішок (леткі вуглеводні, кислотні залишки, кисень, смоли, вода) та змішування з необхідними добавками та присадками для досягнення вимог стандарту якості EN 228 [31].



Зазвичай, основною забруднюючою домішкою у складі компонентів бензину є вода, а наявність інших забруднюючих домішок зумовлена порушеннями технологічного процесу виробництва. Так, алкільати в своєму складі можуть містити кислотні залишки, сірковмісні домішки, леткі вуглеводні. Їх очищення полягає в нейтралізації кислот водним розчином NaOH або розчином аміаку, промиванні водою та осушенні. Ізомерізати в своєму складі можуть містити каталізаторні залишки (AlCl_3 , Pt/цеоліт) та сірковмісні сполуки, які видаляються шляхом фільтрації та осадженням каталізатора, адсорбційним очищенням (видалення сірки та кисневмісних домішок). Основні забруднення риформату – це сірковмісні та азотовмісні домішки, кислотні компоненти. Їх очищують гідродесульфуризацією, адсорбційним очищенням (видалення залишкових кис-

невмісних і металевих домішок), дегазацією та осушенням. Каталізати можуть бути забруднені сіркою, азотом, смолами, твердими частками каталізаторів, які видаляють гідродесульфуризацією (видалення сірки) або гідроочищенням (видалення азоту та олефінів), адсорбційною очисткою (видалення металів і смол).

За представленою схемою, компоненти бензинів, отримані за схемою (див. рис. 2), в залежності від наявності зазначених вище забруднюючих домішок, або проходять стадію осушення та спрямовуються на стадію компаундування з іншими компонентами та присадками, або підлягають більш глибокому очищенню з залученням стадій гідродесульфуризації та адсорбційної очистки.

Блок очищення та доведення компонентів бензину є заключним блоком у загальній схемі виробництва това-

рних автомобільних бензинів з сільсько-господарських відходів, оскільки забезпечує якість, стабільність і безпеку автомобільного палива, тим самим, гарантуючи відповідність вимогам стандартів, що діють у країнах Європейського Союзу.

Висновки

1. Сільськогосподарські відходи України є перспективною альтернативою нафтовій та коксохімічній сировині, що може бути використана у виробництві як товарних автомобільних бензинів, так і їх компонентів, що, у свою чергу, сприяє створенню підґрунтя для енергетичної незалежності, екологічної безпеки та сталого розвитку сучасних технологій.

2. Ефективна підготовка біомаси (сортування, подрібнення, сушка, грануляція) та її активація (наприклад, парова обробка) є ключовими чинниками підвищення виходу цільових продуктів на стадіях її подальшої переробки.

3. Встановлено, що досить перспективними напрямками переробки сільськогосподарських відходів (солони, стебелів, лушпиння, кукурудзяних качанів) виступають: поєднані у єдиний технологічний ланцюг газифікація, синтез Фішера-Тропша, каталітичне модифікування або гідроліз і ферментація. При цьому, перший напрям дозволяє отримати високооктанові компоненти бензинів – алкілати (RON: 92–98 од.; MON: 84–89 од.), ізомерізати (RON: 82–92 од.; MON: 80–82 од.), каталізати (RON: 90–98 од.; MON: 82–85 од.) та риформати (RON: 95–100 од.; MON: 85–88 од.).

4. Поєднання процесів гідролізу та ферментації дозволяє інтенсифікувати перетворення біомаси у спирт (етанол (RON= 108–109; MON = 88–90), бутанол (RON= 94–96; MON = 78–82), які виступають базовими компонентами або проміжною сировиною для синтезу бензинових фракцій.

5. Комплексне інтегрування стадій підготовки, переробки та доведення продуктів дозволяє створити ефективну технологічну схему виробництва бензинів із біомаси – сільсько-господарських відходів, що має екологічні та економічні переваги для України. Запропонована технологія у довгостроковій перспективі може бути економічно вигідною та конкурентоспроможною у порівнянні з імпортними бензинами, особливо враховуючи витрати на логістику та коливання світових цін на нафтову сировину.

Бібліографічний список

1. Чехова І.В. Біоенергетична галузь і олійні культури / І. В. Чехова // *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. – 2023. – № 34. – 156-163.

2. Basera P. Lignocellulosic biomass: insights into enzymatic hydrolysis, influential factors, and economic via-

bility / P. Basera, S. Chakraborty, N. Sharma // *Discov Sustain*. – 2024. – № 5. – P. 311. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00543-5>.

3. Baruah J. Recent Trends in the Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Value-Added Products / J. Baruah, B.K. Nath, R. Sharma, S. Kumar, R.C. Deka, D.C. Baruah, E. Kalita // *Front. Energy Res*. – 2018. – Vol. 6. – P. 141. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00141>.

4. Dragusanu V. Evaluation of the Physical, Mechanical, and Calorific Properties of Briquettes with or without a Hollow Made of Wheat (*Triticum aestivum* L.) / V. Dragusanu, A. Lunguleasa, C. Spirchez // *Straw Waste. Appl. Sci*. – 2022. – Vol. 12. – P. 11936. <https://doi.org/10.3390/app122311936>.

5. Bioenergy Supply Chain Handbook. – BISYPLAN, 2012. URL: <https://www.bioenergyprof.eu/handbooks/bisyplan/html-files-en/03-02.html>

6. Mohammad Reza Ghaffariyan. Short review of collecting technologies and methods in forest harvesting residues recovery / Mohammad Reza Ghaffariyan // *Silva Balcanica*. – 2023. – Vol. 24. – Iss. 1. – P. 55-68. <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.24.e97620/>

7. Adnane I. Valorization of crop residues and animal wastes: Anaerobic co-digestion technology / I. Adnane, H. Taoumi, K. Elouahabi, K. Lahrech, A. Oulmekki // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. – Iss. 5. – P. e26440. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26440>.

8. Suardi A. Comparison between Two Strategies for the Collection of Wheat Residue after Mechanical Harvesting: Performance and Cost Analysis / A. Suardi, W. Stefanoni, S. Bergonzoli, F. Latterini, N. Jonsson, L. Pari // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. – Iss. 12. – P. 4936. <https://doi.org/10.3390/su12124936/>

9. Marcelo B.W. Saad. Industrial pretreatment of lignocellulosic biomass: A review of the early and recent efforts to scale-up pretreatment systems and the current challenges / Marcelo B.W. Saad, Adilson R. Gonçalves // *Biomass and Bioenergy*. – 2024. – Vol. 190. – P. 107426. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107426/>

10. Chen J. Physical–Chemical–Biological Pretreatment for Biomass Degradation and Industrial Applications: A Review / J. Chen, X. Ma, M. Liang, Z. Guo, Y. Cai; C. Zhu, Z. Wang, S. Wang, J. Xu, H. Ying // *Waste*. – 2024. – Vol. 2. – P. 451-473. <https://doi.org/10.3390/waste2040024>.

11. Vidal B.C. Jr. Influence of feedstock particle size on lignocellulose conversion - a review / B.C. Jr. Vidal, B.S. Dien, K.C. Ting, V. Singh // *Appl Biochem Biotechnol*. – 2011. – Vol. 164. – Issue 8. – P. 1405-21. <https://doi.org/10.1007/s12010-011-9221-3>.

12. Zhang M. Biofuel manufacturing from woody biomass: effects of sieve size used in biomass size reduction / M. Zhang, X. Song, T.W. Deines, Z.J. Pei, D. Wang // *J Biomed Biotechnol*. – 2012. – Vol. 2012. – P. 581039. <https://doi.org/10.1155/2012/581039>.

13. Sun Y. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review / Y. Sun, J. Cheng // *Biore-sour Technol.* – 2002. – Vol. 83. – Issue 1. – P. 1-11. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00212-7). PMID: 12058826.
14. Fernando Damián Barajas Godoy. The significance of biowaste drying analysis as a key pre-treatment for trans-forming it into a sustainable biomass feedstock / Fernando Damián Barajas Godoy, Marco A. Martínez-Cinco, José G. Rutiaga-Quiñones, Otoniel Buenrosto-Delgado, Jose Men-doza // *PeerJ.* – 2024. – P. 1-14. <https://doi.org/10.7717/peerj.18248>.
15. Taherzadeh M.J. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review / M.J. Taherzadeh, K. Karimi // *International Journal of Molecular Sciences.* – 2008. – Vol. 94. – Iss. 9. – P. 1621–1651. <https://doi.org/10.3390/ijms9091621>.
16. Pawar P.P. Densification of biomass: Principles and technologies / P.P. Pawar, M. Kaur // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2019. – Vol. 110. – P. 515–531. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.039>.
17. Yali Gao Miao. Syngas Production from Biomass Gasification: Influences of Feedstock Properties, Reactor Type, and Reaction Parameters / Yali Gao Miao, Wang, Abdul Raheem, Fuchen Wang, Juntao Wei, Deliang Xu, Xudong Song, Weina Bao, Ankui Huang, Shu Zhang, Hong Zhang // *ACS Omega.* – 2023. – Vol. 8. – Iss. 35. – P. 31620–31631. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03050>.
18. Осмак О.О. Системний підхід до вирішення проблеми газифікації рослинної біомаси / О.О. Осмак, О.О. Сербогін // *Харчова промисловість.* – 2011. – № 11. – С. 95-100.
19. Lillebo A. Fischer–Tropsch Synthesis at High Con-versions on Al₂O₃-Supported Co Catalysts with Different H₂/CO Levels / A. Lillebo, E. Rytter, E. A. Blekkan, A. Holmen // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2017. – Vol. 56. – Iss. 45. – P. 13281–13286. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b01801>.
20. Jafar Shariati. Fischer–Tropsch synthesis using Co and Co–Ru bifunctional nanocatalyst supported on carbon nanotube prepared via chemical reduction method / Jafar Shariati, Ali Haghtalab, Amir Mosayebi // *Journal of Energy Chemistry.* – 2019. – Vol. 28. – P. 9-22. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2017.10.001>.
21. Anthony Andrews. Fischer–Tropsch fuels back-ground (F–T to liquids) / Anthony Andrews, Jeffrey Logan // CRS Report RL34133, 2008. – 34 p. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.everycrsreport.com/reports/RL34133.html>.
22. Alejandro Ayala-Cortés. Upgrading Fischer-Tropsch waxes to produce transport fuels by catalytic hydrocracking/isomerization: A review / Alejandro Ayala-Cortés, Christian Di Stasi, Daniel Torres, José Luis Pinilla, Isabel Suelves // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2025. – Vol. 215. – P. 115633. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115633>.
23. Frątczak J. Hydrocracking of Heavy Fischer-Tropsch Wax Distillation Residues and Its Blends with Vacuum Gas Oil Using Phonolite-Based Catalysts / J. Frątczak, H. de Paz Carmona, Z. Tišler, J.M. Hidalgo Herrador, Z. Gholami // *Molecules.* – 2021. – Vol. 26. – Iss. 23. – P. 7172. <https://doi.org/10.3390/molecules26237172>.
24. Olsen T. An Oil Refinery Walk-Through / T. Olsen // *Chemical Engineering Progress.* – 2014. – Vol. 110. – Iss. 5. – P. 34-40.
25. Capolupo L. Green methods of lignocellulose pretreatment for biorefinery development / L. Capolupo, V. Faraco // *Appl Microbiol Biotechnol.* – 2016. – Vol. 100. – P. 9451–9467. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7884-y>.
26. Sun J. Review and perspectives of enhanced volatile fatty acids production from acidogenic fermentation of lignocellulosic biomass wastes / J. Sun, L. Zhang, K.C. Loh // *Bioresour. Bioprocess.* – 2021. – Vol. 8. – Issue 8. – P. 68. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00420-3>.
27. Parapouli M. Saccharomyces cerevisiae and its industrial applications / M. Parapouli, A. Vasileiadis, A.S. Afendra, E. Hatziloukas // *AIMS Microbiol.* – 2020. – Vol. 6. – Iss. 1. – P. 1-31. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2020001>.
28. Ingram L.O. Metabolic engineering of bacteria for ethanol production / L.O. Ingram, P.F. Gomez, X. Lai, M. Moniruzzaman, B.E. Wood, L.P. Yomano, S.W. York // *Biotechnol Bioeng.* 1998 Apr 5;58(2-3):204-14. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0290\(19980420\)58:2/3<204::aid-bit13>3.0.co;2-c](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0290(19980420)58:2/3<204::aid-bit13>3.0.co;2-c).
29. Badia J.H. New Octane Booster Molecules for Modern Gasoline Composition / J.H. Badia, E. Ramírez, R. Bringué, F. Cunill, J. Delgado // *Energy Fuels.* – 2021. – Vol. 35. – Iss. 14. – P. 10949–10997. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00912>.
30. Sebastian Verhelst. Methanol as a fuel for internal combustion engines / Sebastian Verhelst, James W.G. Turner, Louis Sileghem, Jeroen Vancoillie // *Progress in Energy and Combustion Science.* – 2019. – Vol. 70. – P. 43-88. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.001>.
31. EN 228:2025 Automotive fuels — Unleaded petrol — Requirements and test methods. European Committee for Standardization. Retrieved February 20, 2026. – 21 p. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/05626b8c-ce8d-409d-a02d-b7bba8071b02/en-228-2025>.

UTILIZATION OF AGRICULTURAL WASTE AS AN ALTERNATIVE TO PETROLEUM AND COKE-CHEMICAL RAW MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF AUTOMOTIVE GASOLINES© K.V. Shevchenko¹, A.B. Grigorov²

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 61002, Kharkiv, 2 Kirpichova St., Ukraine

¹ Shevchenko Kyrylo Volodymyrovych, Ph.D. in Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of Oil, Gas and Solid Fuel Processing Technologies (TPNG and TP), ORCID: 0000-0002-4819-4663, Scopus ID: 57221911422, e-mail: drekstar2007@gmail.com

² Andriy Borisovich Grigorov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of TPNG and TP, ORCID: 0000-0001-5370-7016, Scopus ID: 55894206900, e-mail: grigorovandrey@ukr.net

The article examines the possibilities of utilizing agricultural waste as an alternative to petroleum and coke-chemical feedstocks for the production of automotive gasoline components in Ukraine. The resource potential of biomass is analyzed, particularly cereal straw, maize residues, husks, and other lignocellulosic wastes, which can be effectively used as a source of hydrocarbons for producing motor fuels, including automotive gasoline. It is established that the key stage is feedstock preparation, which includes sorting, cleaning, grinding, drying, and pelletizing, ensuring homogeneity and enhancing the efficiency of subsequent processes. Special attention is paid to biomass activation methods, particularly steam treatment, which promotes the breakdown of the lignocellulosic structure and increases the accessibility of polysaccharides for hydrolysis.

Two main pathways for biomass processing are considered. The first combines gasification, Fischer–Tropsch synthesis, and catalytic modification, while the second involves hydrolysis and fermentation. The first pathway allows the conversion of biomass into alkylates (RON: 92–98; MON: 84–89), isomerates (RON: 82–92; MON: 80–82), catalyates (RON: 90–98; MON: 82–85), and reformates (RON: 95–100; MON: 85–88). The second pathway enables the production of alcohols, such as ethanol (RON = 108–109; MON = 88–90) and butanol (RON = 94–96; MON = 78–82), with high yields (ethanol: 85–95 %; butanol: 60–65 %). The technological features of separating and purifying fermentation products are presented. It is shown that the obtained alcohols can be used either as direct gasoline components or as feedstock for further hydrocarbon synthesis.

The necessity of purification and finishing stages, including drying, hydrodesulfurization, and adsorption-based cleaning, is justified, ensuring compliance with modern environmental and operational requirements for automotive gasoline. It is concluded that an integrated combination of biomass preparation, activation, and processing allows the creation of an efficient technology for producing automotive gasoline components from renewable feedstocks, representing a promising direction for enhancing Ukraine’s energy independence and environmental security.

Keywords: agricultural waste; biomass; petroleum and coke-chemical feedstocks; automotive gasoline; gasification; synthesis; catalytic modification; hydrolysis; fermentation; ethanol; butanol.

Corresponding author: A.B. Hryhorov, e-mail: grigorovandrey@ukr.net

Manuscript received 2026/02/20

Accepted for publication 2026/03/30

Published 2026/04/17

This article is licensed under a CC BY 4.0 license

ОПТИМІЗАЦІЯ АЛКІДНИХ / ЕПОКСИ-ЕФІРНИХ ГРУНТ-ЕМАЛЕВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ РЕЦЕПТУРИ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ АНТИКОРОЗІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ© С.Л. Жаров¹, О.В. Квасов²

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, м. Харків, вул. Курпичова, 2, Україна

¹ Жаров Сергій Леонідович, аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива (ТПНГ та ТП), ORCID: 0009-0007-0038-2802, e-mail: slzharov1977@gmail.com

² Квасов Олександр Вікторович, аспірант кафедри ТПНГ та ТП, ORCID: 0009-0000-2948-692X, e-mail: 0099778@gmail.com

Алкідні та епокси-ефірні ґрунт-емалеві системи продовжують залишатися популярними для промислового захисту сталевих конструкцій від корозії, оскільки вони технологічно універсальні, економічно вигідні і можуть використовуватися зі звичним обладнанням для нанесення. Тим не менш, їхні антикорозійні властивості безпосередньо пов'язані із завантаженням пігменту, міжфазною модифікацією, функціональністю інгібіторів тощо. У цьому дослідженні представлено експериментальне дослідження щодо покращення характеристик зазначених емалей шляхом оптимізації рецептури при нанесенні ґрунт-емалевого покриття на основі алкіду/епокси-ефіру на поверхні вуглецевої сталі. Вісім стандартних покриттів були приготовані за однакових технологічних умов, що відрізнялися концентрацією фосфату цинку, додаванням органічних інгібіторів корозії та застосуванням промоторів адгезії на основі силанів.

Показники якості, включно з товщиною сухої плівки, адгезією (ISO 2409), щільністю дефектів та ефективністю інгібіторів, оцінювали до спричинення корозійного впливу. Кількісні показники пошкодження, такі як час до першої видимої корозії, площа корозійної поверхні, довжина розширення і збереження адгезії, використовувалися для оцінки корозійної поведінки після впливу. Відносний індекс корозійної стійкості був використаний для побудови графіків залежності від рецептури. Результати показують, що оптимізація рецептури призводить до значного, чисельно вимірюваного покращення антикорозійних характеристик. Підвищене завантаження фосфату цинку також призвело до покращення формування плівки та цілісності бар'єру з силановими промоторами адгезії, що призвело до підвищення міжфазної стабільності та корозійної стійкості під плівкою.

Отримані результати мають особливе практичне значення для коксохімічної промисловості, де антикорозійні покриття широко застосовуються для захисту сталевих обладнання агрегатів, що працюють у хімічно агресивних середовищах.

Ключові слова: алкідні покриття; епокси-ефірні системи; антикорозійні ґрунтовки; цинк-фосфатний пігмент; силанові промотори адгезії; органічні інгібітори корозії; оптимізація рецептури покриттів.

Автор для листування С.Л. Жаров, e-mail: slzharov1977@gmail.com

Рукопис надійшов до редакції 16.02.2026

Прийнято до публікації 30.03. 2026

Опубліковано 17.04.2026 Ця стаття ліцензується відповідно до міжнародної ліцензії CC BY 4.0

1 Вступ

Проблема корозії сталевих конструкцій є однією з найпоширеніших в інженерному співтоваристві промислових систем, таких як коксохімічне виробництво, а також енергетика, транспорт, будівництво та інфраструктура [1]. Промислові антикорозійні плівки повинні відповідати декільком експлуатаційним вимогам, включаючи забезпечення бар'єру, адгезію до основи, підтримку механічної міцності та стійкість до руйнування навколишнього середовища [2]. Серед сполучників систем, що використовуються в промисловому покритті, алкідні та епокси-ефірні смоли залишаються дуже популярними завдяки доброму балансу експлуатаційних характеристик, технологічності та вартості [3].

Особливої актуальності проблема антикорозійного захисту набуває у коксохімічній промисловості, де технологічне обладнання експлуатується в умовах високих температур, наявності агресивних газових і рідинних середовищ та продуктів переробки вугілля. Установки коксування, системи очищення коксового газу, апарати переробки кам'яновугільної смоли та інші елементи технологічного ланцюга коксохімічних виробництв працюють у середовищах, що містять корозійно-активні компоненти, включаючи сірковмісні сполуки, аміак, феноли та органічні кислоти. Це призводить до прискореної деградації металевих конструкцій і потребує застосування ефективних захисних покриттів. Відомо, що властивості вугілля, процеси його окиснення та переробки суттєво впливають на склад і агресивність технологічних середовищ коксохімічних виробництв. У цьому контексті розробка оптимізованих антикорозійних покриттів для сталевих поверхонь є важливою складовою підвищення надійності обладнання підприємств коксохімічної галузі.

Одним з найпоширеніших антикорозійних пігментів у промислових ґрунтовках є фосфат цинку. Їх захисний ефект зазвичай пояснюється утворенням нерозчинних фосфатних шарів на межі розділу сталь-покриття, що уповільнює анодне розчинення і гальмує початок корозії. Крім інгібувальної ролі, фосфатні пігменти цинку покращують мікроструктуру та бар'єрні властивості покриття, впливаючи на об'ємну концентрацію та компактність захисної плівки [4]. Ефективність інгібіторів, однак, залежить від їх сумісності з рецептурою і від їх транспортування матрицею покриття, вплив яких на загальну ефективність не може бути незалежно оцінений в контексті інших змінних рецептури [5].

Міжфазна модифікація промоторами адгезії на основі силанів інтенсивно вивчається як один з методів посилення зв'язку між покриттям і основою та протистояння підплівковій корозії [6]. Змінні складові рецептури, такі як вміст фосфату цинку, введення органічного інгібітору корозії та введення силанового промотора адгезії, випробовуються в однакових технологічних умовах. Дослідження встановлює чіткий взаємозв'язок між рецептурою та експлуатаційними характеристиками і дозволяє проводити пряме порівняння між базовою та оптимізованою системами покриттів, включаючи що показники якості покриття, то й кількісні показники корозійних пошкоджень після експозиції.

1.1. Огляд літератури

Дія бар'єрного захисту, електрохімічного інгібування та міжфазної стабільності традиційно сприймається як комбінація антикорозійних методів у промислових системах покриттів. Багато досліджень показують, що жоден окремий механізм не може забезпечити довготривалий захист сталевих пластин за несприятливих умов впливу. Швидше за все, хороша корозійна стійкість є результатом взаємодії структурних і функціональних факторів, залежних від рецептури, які разом визначають цілісність і довговічність покриття [7].

Бар'єрний захист є найпоширенішим захисним заходом в органічних покриттях, оскільки він визначає швидкість просочування електроліту через поверхню металу. Товщина, компактність і щільність дефектів плівки є важливими параметрами, які визначають ефективність бар'єрного захисту. Попередні дослідження показали, що вища об'ємна концентрація пігменту і краща дисперсність пігменту пов'язані з нижчою проникністю покриття і довшим часом до корозії. Тим не менш, перевантаження пігментом може спричинити погане формування плівки і підвищену концентрацію дефектів, що вказує на оптимальний діапазон пігменту, а не на лінійну кореляцію між концентрацією пігменту і бар'єрними характеристиками [8].

Фосфатні пігменти цинку широко досліджуються як екологічно чисті замітники інгібіторів на основі хроматів в антикорозійних ґрунтовках. Їх захисний ефект

пов'язаний з утворенням нерозчинних фосфатних шарів на межі розділу сталь-покриття, які перешкоджають анодному розчиненню і стабілізують продукти корозії. Експериментальні дослідження показали, що ефективність фосфатів цинку значною мірою визначається концентрацією пігменту, морфологією частинок і взаємодією частинок з матрицею сполучника. Пігменти фосфатів цинку, окрім інгібувальної ролі, також модифікують мікроструктуру плівки і сприяють підвищенню бар'єру [9], тому вони не були призначені виключно для виконання електрохімічної ролі.

Ще однією важливою групою добавок, що використовуються для покращення характеристик покриття, є органічні інгібітори корозії. Ці сполуки зазвичай діють шляхом адсорбції на металі та порушують анодні та катодні реакції, тим самим мінімізуючи швидкість корозії, незважаючи на локальні дефекти покриття. Серед найбільш вивчених інгібіторів з високою спорідненістю до залізних і сталевих поверхонь найпоширенішими є похідні бензотриазолу і триазолу. Однак контрольоване вивільнення, сумісність зі сполучними речовинами та транспортування через матрицю покриття ускладнюють пряме порівняння різних рецептур [10].

Роль міжфазної адгезії в антикорозійних характеристиках привертає все більшу увагу в останні кілька років. Слабка адгезія сприяє поширенню корозійної підплівки і сприяє відшаруванню покриття, як тільки починається корозія. Промотори адгезії на основі силанів широко вивчалися як міжфазні модифікатори, які можуть створювати стабільний зв'язок між поверхнями сталі та органічних полімерних матриць. Багато досліджень показали, що в системах, модифікованих силанами, адгезія зберігається краще і менше розшаровується, особливо у вологих або сольових середовищах. Тим не менш, ефективність силану чутлива до підготовки поверхні, умов затвердіння і сумісності рецептури, тому його ефективність не може бути легко узагальнена [11].

Алкідні та епоксидні сполучники також широко використовуються в промислових покриттях для технічного обслуговування, незважаючи на наявність високоєфективних епоксидних і поліуретанових систем. Причиною їхньої актуальності є простота нанесення, толерантність до варіативності підготовки поверхні та сприятливе співвідношення ціни та якості. У літературі повідомляється, що алкідні та епоксидні покриття можуть забезпечити досить добрий початковий захист, але їх ефективність може бути обмежена через помірні бар'єрні властивості та міжфазне руйнування в довгостроковій перспективі. Отже, використання рецептурних стратегій, які б покращували цілісність бар'єру та міжфазну стабільність, є особливо актуальним для цього типу покриттів [12].

Інші дослідження спрямовані на покращення антикорозійних властивостей шляхом інтеграції неорганічних пігментів, органічних інгібіторів та промоторів адгезії. Хоча ці методи зазвичай призводять до кращої корозійної стійкості, більшість досліджень зосереджені на окремих показниках ефективності або конкретних експозиціях. У більшості випадків технологічні параметри, такі як метод нанесення, режим затвердіння і товщина плівки, не контролюються, що ускладнює виокремлення впливу рецептури. Крім того, кількісне порівняння між базовою та оптимізованою системами часто є обмеженим, що утруднює практичну застосовність отриманих результатів [13].

Ще одним недоліком існуючої літератури є те, що показники ефективності ще не були інтегровані, щоб врахувати загальний внесок бар'єрних властивостей, ефективності інгібування та міжфазної стабільності. У той час як окремі параметри, такі як корозійний потенціал, імпедансна характеристика або втрата маси, є загальновідомими, об'єктивні порівняльні дані про взаємозв'язок між показниками якості покриття і ступенем корозійного пошкодження в кінці експозиції наводяться в меншій кількості досліджень. Ця невідповідність особливо помітна для алкідних і епоксидно-ефірних систем ґрунтовки-емалі, оскільки їхні склади часто оптимізуються на основі досвіду, а не систематичного кількісного аналізу [14].

Загалом, наявна література створює значне підґрунтя для розуміння окремих механізмів антикорозійного захисту та компонентів рецептур. Тим не менш, вона також вказує на необхідність системних експериментальних досліджень в рамках загальної технологічної схеми, що дозволило б проводити пряме чисельне порівняння варіантів рецептур і фактичне визначення кореляцій між рецептурою і ефективністю в промислових системах покриттів.

1.2. Метою даної роботи є розробка системної та кількісної оцінки антикорозійної поведінки алкідних та епоксидно-ефірних ґрунт-емалевих систем на сталевих основах залежно від рецептури на основі операцій в строго ідентичних технологічних умовах. Для реалізації цієї мети були поставлені наступні завдання: (1) підготувати послідовність рецептур ґрунт-емалі, в яких контролювано ступінь включення фосфату цинку, введення органічного інгібітора корозії та міжфазну модифікацію поверхні; (2) виміряти показники якості покриття до впливу корозії, включаючи (а) товщину плівки, (б) адгезію, (в) щільність дефектів та (г) ефективність інгібітора, перед тим, як продовжити вплив на нього корозії; (3) кількісно оцінити корозійну активність після впливу корозії. Виконання цих завдань на наглядній експериментальній системі дозволить створити технічну основу для оптимізації раціональних рецептур алкідних та епоксидно-ефірних ґрунт-емалевих покриттів для захисту від корозії промислових об'єктів.

2. Методологія

2.1. Загальна методологія та обсяг дослідження

Методологія цього дослідження розроблена відповідно до принципів хімічної технології антикорозійних покриттів і зосереджена на приготуванні, нанесенні та оцінці епоксидно-ефірних ґрунтовок на основі розчинників та алкідних емалевих покриттів, призначених для захисту підкладок з вуглецевої сталі. Основною метою методології є систематичне дослідження того, як рецептура покриття і технологічна обробка впливають на показники якості покриття і, як наслідок, на антикорозійні характеристики.

2.2. Загальна блок-схема дослідження



Рис. 1 Загальна блок-схема дослідження

Логічна послідовність методології дослідження проілюстрована на рис. 1, де представлена уніфікована блок-схема, що охоплює всі етапи дослідження, від вибору матеріалу до інтерпретації корозійної поведінки.

На рис. 1 показано, що дослідження починається з вибору епоксидно-ефірних ґрунтовок на основі розчинників та алкідних емалей і продовжується через контрольовані етапи розробки та підготовки. Потім отримують кілька варіантів покриттів і наносять їх на пластини з вуглецевої сталі за визначених технологічних умов. Після затвердіння і формування плівки оцінюються показники якості покриття, які характеризують цілісність плівки і функціональну активність інгібітора. На заключному етапі проводиться чисельна інтерпре-

тація спостережуваної корозійної поведінки для встановлення взаємозв'язку між технологічними параметрами, показниками якості покриття та корозійною стійкістю.

2.3. Матеріали та системи антикорозійних покриттів

Для демонстрації промислового значення експериментальної методики на рис. 2 наведений наочний приклад високошвидкісного дисперсійного обладнання, що використовується для інкорпорації пігментів і наповнювачів під час приготування покриттів.



Рис. 2 Промисловий високошвидкісний диспергатор для приготування ґрунт-емалевих композицій

Високошвидкісний диспергатор забезпечує інтенсивне введення механічної енергії, необхідної для ефективного змочування пігменту, деагломерації та гомогенного розподілу твердих компонентів у матриці рідкого сполучника. Використання промислового дисперсійного обладнання підтверджує, що застосована процедура приготування відповідає практичним умовам

виробництва покриттів, а не ідеалізованому змішуванню в лабораторії.

2.4. Підготовка та розробка рецептур антикорозійних покриттів

На початковому етапі полімерний сполучник вводиться в змішувальну ємність разом із заздалегідь визначеною порцією органічного розчинника для досягнення відповідної початкової в'язкості. Для ґрунтовок використовували епокси-ефірні смоли як основний плівкоутворювальний компонент, а для емалевих покриттів – алкідні смоли як сполучник. Для забезпечення попередньої гомогенізації рідкої фази перед введенням твердих компонентів використовували механічне перемішування.

Антикорозійні пігменти та мінеральні наповнювачі додавали поступово при безперервному перемішуванні. Фосфат цинку був включений як основний інгібуючий пігмент, тоді як бар'єрні пігменти та розширювачі були введені для регулювання компактності та механічних властивостей плівки. Додавання пігментів здійснювалося в контрольованих умовах з метою запобігання агломерації і сприяння ефективному змочуванню сполучника.

Після завершення диспергування у визначеній послідовності вводили функціональні добавки. Ці добавки включали органічні інгібітори корозії, антиседиментаційні агенти, модифікатори течії та, де це можливо, промотори адгезії на основі силанів. Послідовність додавання була підібрана таким чином, щоб мінімізувати несприятливі взаємодії між компонентами і забезпечити стабільне включення кожної добавки в рецептуру.

Всі лакофарбові композиції готувалися при кімнатній лабораторній температурі. Для збереження технологічності та відтворюваності, притаманних промислового виробництва покриттів, не застосовували прискорювачів затвердіння або нестандартних умов переробки.

2.5. Варіанти покриттів та диференціація рецептур

Досліджувані варіанти покриттів та їхні ключові рецептурні характеристики наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Дослідження органорозчинних алкідних/епокси-ефірних ґрунт-емалевих систем: порівняння та диференціація рецептур

Варіант	Система покриття	Ґрунт сполучник	Емаль сполучник	Цинк фосфат рівень	Органічний інгібітор	Силан промотер
V1	Ґрунт + емаль	Епокси-ефір	Алкід	Базовий	Ні	Ні
V2	Ґрунт + емаль	Епокси-ефір	Алкід	Базовий	Так	Ні
V3	Ґрунт + емаль	Епокси-ефір	Алкід	Базовий	Ні	Так
V4	Ґрунт + емаль	Епокси-ефір	Алкід	Базовий	Так	Так
V5	Ґрунт + емаль	Ероху-ester	Алкід	Підвищений	Ні	Ні
V6	Ґрунт + емаль	Ероху-ester	Алкід	Підвищений	Так	Ні
V7	Ґрунт + емаль	Ероху-ester	Алкід	Підвищений	Ні	Так
V8	Ґрунт + емаль	Ероху-ester	Алкід	Підвищений	Так	Так

Табл. 1 демонструє, що схема проведення експериментальних досліджень ґрунтується на матричному підході, в якому кожен параметр рецептури систематично варіюється, тоді як всі інші фактори залишаються постійними. Досліджували два рівні фосфату цинку: базовий вміст, що відповідає стандартній промисловій практиці, і підвищений вміст, призначений для посилення пасивації та бар'єрних ефектів. Ця варіація дозволяє оцінити, як завантаження пігменту впливає на компактність плівки та корозійну стійкість.

2.6. Нанесення ґрунтовок та емалей на сталеву основу

Після підготовки та кондиціонування антикорозійні ґрунт-емалеві системи наносили на пластини з вуглецевої сталі в суворо контрольованих, відтворюваних технологічних умовах. Перед нанесенням покриття сталеві

пластини були механічно очищені та знежирені для видалення поверхневих забруднень, продуктів корозії та залишків мастил. Першим покриттям були епоксифірні сполучники на основі розчинників. Нанесення здійснювалося за допомогою звичайної техніки розпилення, відповідно до промислової практики. В'язкість покриття регулювали у визначеному діапазоні для забезпечення стабільного розпилення та рівномірного формування вологої плівки. Цільова товщина сухої плівки шару ґрунтовки контролювалася за допомогою норми нанесення і перевірялася після затвердіння.

2.7. Показники якості покриттів та їхній вплив на корозійну поведінку

Концептуальний взаємозв'язок між технологією нанесення покриттів, показниками якості та механізмами захисту від корозії проілюстровано на рис. 3.

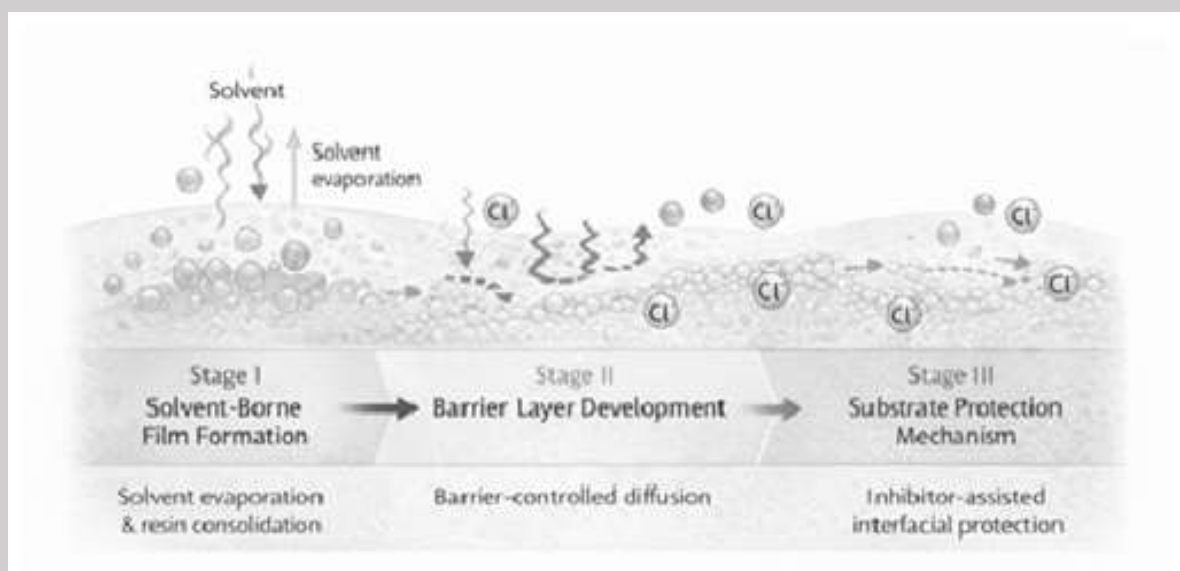


Рис. 3 Схематичне зображення механізму плівкоутворення, формування бар'єрного шару та міжфазного захисту за участю інгібіторів

Таблиця 2

Показники якості покриття та їхній вплив на корозійну поведінку

Показник якості	Технологічне походження	Вплив на характер корозії
Товщина сухої плівки	Норма нанесення, контроль в'язкості	Визначає бар'єрну ефективність та опір дифузії
Адгезія до сталі	Підготовка поверхні, хімія сполучника, силанові промотори	Контролює підплівкову корозію та відшарування
Пористість та щільність дефектів	Диспергування пігменту, плівкоутворення	Створює шляхи для проникнення електроліту
Активність інгібітору	Тип пігменту, наявність інгібітору	Пригнічує електрохімічні корозійні процеси

На рис. 3 схематично показано, як технологічні параметри, такі як якість дисперсії, умови нанесення та режим затвердіння, визначають показники якості покриття, включаючи товщину плівки, адгезію до сталеві основи, пористість і щільність дефектів, а також функціональну активність антикорозійних компонентів. Ці показники в сукупності визначають стійкість системи покриття до проникнення електроліту та ініціювання корозії. Структурований огляд ключових показників якості покриттів, оцінених у цьому дослідженні, та їхнього впливу на корозійну поведінку представлено в табл. 2.

2.8. Оцінювання антикорозійної активності покриттів

Антикорозійну активність приготуваних ґрунт-емалевих систем оцінювали шляхом витримування покритих сталевих зразків у корозійних середовищах, що репрезентують умови промислової експлуатації. Оцінка була зосереджена на порівняльній оцінці руйнування покриттів, а не на визначенні абсолютних швидкостей корозії.

Під час експозиції зразки з покриттям періодично оглядали на предмет появи дефектів, пов'язаних з корозією, включаючи підплівкову корозію, утворення пухирів, відшарування покриття і втрату адгезії. Ступінь і розподіл цих дефектів використовувалися як основні показники антикорозійної ефективності.

2.9. Інтерпретація корозійної поведінки на основі розробленої моделі

Для підтримки інтерпретації експериментально спостережуваних тенденцій корозії як додатковий аналітичний інструмент було використано спрощену фізико-хімічну модель. Модель встановлює кількісні взаємозв'язки між показниками якості покриття і процесами транспорту та інгібування, пов'язаними з корозією. Потік агресивних речовин через шар покриття описується дифузійною залежністю:

$$J = -D_{eff} \frac{C_{ext} - C_{int}}{L}, \quad (1)$$

де J – потік агресивних речовин через покриття

(моль·м⁻²·с⁻¹), D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії в

покритті (м²·с⁻¹), C_{ext} та C_{int} – концентрації агресивних

речовин на зовнішній поверхні покриття та на межі розділу метал-покриття відповідно (моль·м⁻³), L

– товщина покриття (м).

Для врахування впливу пористості та дефектної структури на масоперенос ефективний коефіцієнт дифузії виражається як:

$$D_{eff} = D_0 \cdot \varepsilon^n, \quad (2)$$

де D_0 – коефіцієнт дифузії в бездефектній полімерній

матриці (м²·с⁻¹), ε – об'ємна пористість покриття, а n –

структурна експонента, що відображає зв'язність пор.

Ефективність інгібування корозії, що забезпечується антикорозійними пігментами та органічними інгібіторами, характеризується параметром ефективності інгібування:

$$\eta = \frac{i_0 - i_{inh}}{i_0}, \quad (3)$$

де η – ефективність інгібування (безрозмірна вели-

чина), i_0 – густина струму корозії за відсутності інгібі-

торів, i_{inh} – густина струму корозії в присутності ан-

तिकорозійних компонентів.

3. Результати

3.1. Показники якості покриттів алкідних та епоксифірних ґрунт-емалевих систем

Для оцінки впливу рецептурних параметрів на цілісність плівки та функціональні властивості було оцінено комплекс показників якості покриття для всіх варіантів алкідної/епокси-ефірної ґрунт-емалі (табл. 3). Порівняння проводилося за ідентичних умов нанесення та затвердіння. Це гарантує, що відмінності, які спостерігаються, відображають ефекти, пов'язані з рецептурою, а не з технологічною варіативністю.

Збільшення вмісту фосфату цинку призвело до помітного збільшення товщини сухої плівки, що свідчить про покращення формування плівки та посилення безперервності бар'єру. Композиції з низьким вмістом фосфатів утворювали тонші плівки, тоді як композиції з високим вмістом фосфатів утворювали товстіші та компактніші шари покриття.

Адгезійні характеристики показали значну залежність від міжфазної модифікації. Покриття без силанових промоторів адгезії продемонстрували помірну адгезію до сталеві пластини, тоді як модифіковані силанами варіанти досягли значно кращих класів адгезії. Така поведінка вказує на посилення хімічної взаємодії на межі розділу покриття-метал та підвищення стійкості до міжфазного розшарування.

Таблиця 3

Показники якості покриття досліджених варіантів алкідних/епокси-ефірних грунт-емалей (V1-V8)

Варіант	Товщина сухої плівки, μm	Адгезія (ISO 2409)	Щільність дефектів, бал (0-5)	Ефективність інгібітору, %
V1	82 ± 5	3	4	0
V2	85 ± 6	3	4	30
V3	88 ± 5	1	3	0
V4	90 ± 6	1	3	34
V5	108 ± 7	3	2	0
V6	112 ± 8	3	2	39
V7	115 ± 6	0	1	0
V8	118 ± 7	0	1	44

Щільність дефектів послідовно зменшувалася зі збільшенням вмісту пігменту та міжфазної модифікації. Склади, що характеризуються низьким вмістом фосфату цинку і відсутністю силанових промоторів, демонстрували вищі показники щільності дефектів, тоді як системи з високим вмістом фосфату цинку, модифіковані силаном, мали мінімальний рівень дефектоутворення. Зменшення щільності дефектів свідчить про однорідніше формування плівок та покращення диспергування твердих компонентів у матриці сполучника.

Органічні інгібітори корозії переважно впливали на ефективність інгібітора, не впливаючи суттєво на товщину плівки або адгезійні характеристики. Варіанти з інгібіторами продемонстрували вимірювану ефектив-

ність інгібування, що підтверджує ефективне електрохімічне пригнічення на межі розділу покриття-сталь. На протипагу цьому, композиції без інгібіторів демонстрували незначну інгібуючу активність, незважаючи на співставні структурні властивості плівок.

3.2. Показники корозійного руйнування після випробувань.

Кількісні результати після експозиції наведено в табл. 4. Вибрані показники охоплюють час до появи першої видимої корозії, площу корозійної поверхні, довжину відшарування і збереження адгезії після експозиції. Разом ці параметри відображають комбінований вплив цілісності покриття, міжфазної стабільності та функціональної активності інгібітора.

Таблиця 4

Кількісні показники корозійних пошкоджень алкідних / епокси-ефірних грунт-емалевих систем після випробувань (V1-V8)

Варіант	Час до появи першої видимої корозії, год.	Площа корозійного ураження, %	Довжина відшарування, мм	Адгезія після випробувань (ISO 2409)
V1	96	22	14	4
V2	145	18	12	4
V3	160	14	8	3
V4	195	11	7	2
V5	230	10	9	3
V6	280	7	6	2
V7	315	5	3	1
V8	360	3	2	1

Еталонний склад (V1) продемонстрував найнижчу стійкість до корозійного впливу. Перша видима корозія спостерігалася приблизно через 96 годин і супроводжувалася значною деградацією поверхні (22 % корозійної площі) та вираженим міжфазним руйнуванням, про що свідчить довжина розшарування 14 мм і погана адгезія (клас 4 за ISO 2409). Ці результати свідчать про швидке

проникнення електроліту через дефекти покриття і обмежену здатність системи пригнічувати підплівкову корозію. Введення органічного інгібітору корозії без міжфазної модифікації (V2) призвело до затримки початку корозії (145 год) і помірного зменшення поверхневого корозійного пошкодження. Проте довжина розшарування і збереження адгезії залишилися порівнян-

ними з еталонною системою, що вказує на те, що дія інгібітора сама по собі не забезпечує достатнього захисту від міжфазного руйнування в алкідних / епоксифірних покриттях.

Склади, що включають промотори адгезії на основі силану (V3 і V4), показали подальше поліпшення характеристик після експозиції. Ініціація корозії була затримана до 160-195 год, в той час як площа корозійної поверхні поступово зменшувалася з 14 % для V3 до 3 % для V8. Довжина розшарування зменшилася до 7-8 мм, а адгезійне зчеплення покращилося до 2-3 класів за ISO 2409. Ці результати демонструють підвищену стійкість до бічного розповсюдження корозії завдяки покращеному зчепленню покриття з основою.

Найвищий рівень стабільності після експозиції спостерігався у композиціях з вищим вмістом фосфату цинку (V5-V8). Ці системи продемонстрували прогресуючу затримку початку корозії до 360 год і значне зменшення площі корозійної поверхні, до 3 % для оптимізованої рецептури. Довжина розшарування зменшилася до 2-3 мм, а адгезійні властивості покращилися до 1-2 класів за ISO 2409. Серед них варіант V8 продемонстрував найбільш стабільну поведінку після експозиції, поєднуючи в собі затримку початку корозії, мінімальну деградацію поверхні та стійку адгезію.

3.3. Динаміка корозійної стійкості алкідних та епоксифірних композитів

На рис. 4 представлено індекс корозійної стійкості (CRI), отриманий на основі кількісних показників пошкодження, наведених у табл. 4. Таке графічне представлення дозволяє провести порівняльне ранжування досліджуваних складів і висвітлити домінуючі тенденції, що залежать від складу.

На рис. 4 представлено індекс корозійної стійкості (CRI), отриманий на основі кількісних показників пошкодження, наведених у табл. 4. Таке графічне представлення дозволяє провести порівняльне ранжування досліджуваних складів і висвітлити домінуючі тенденції, що залежать від складу.

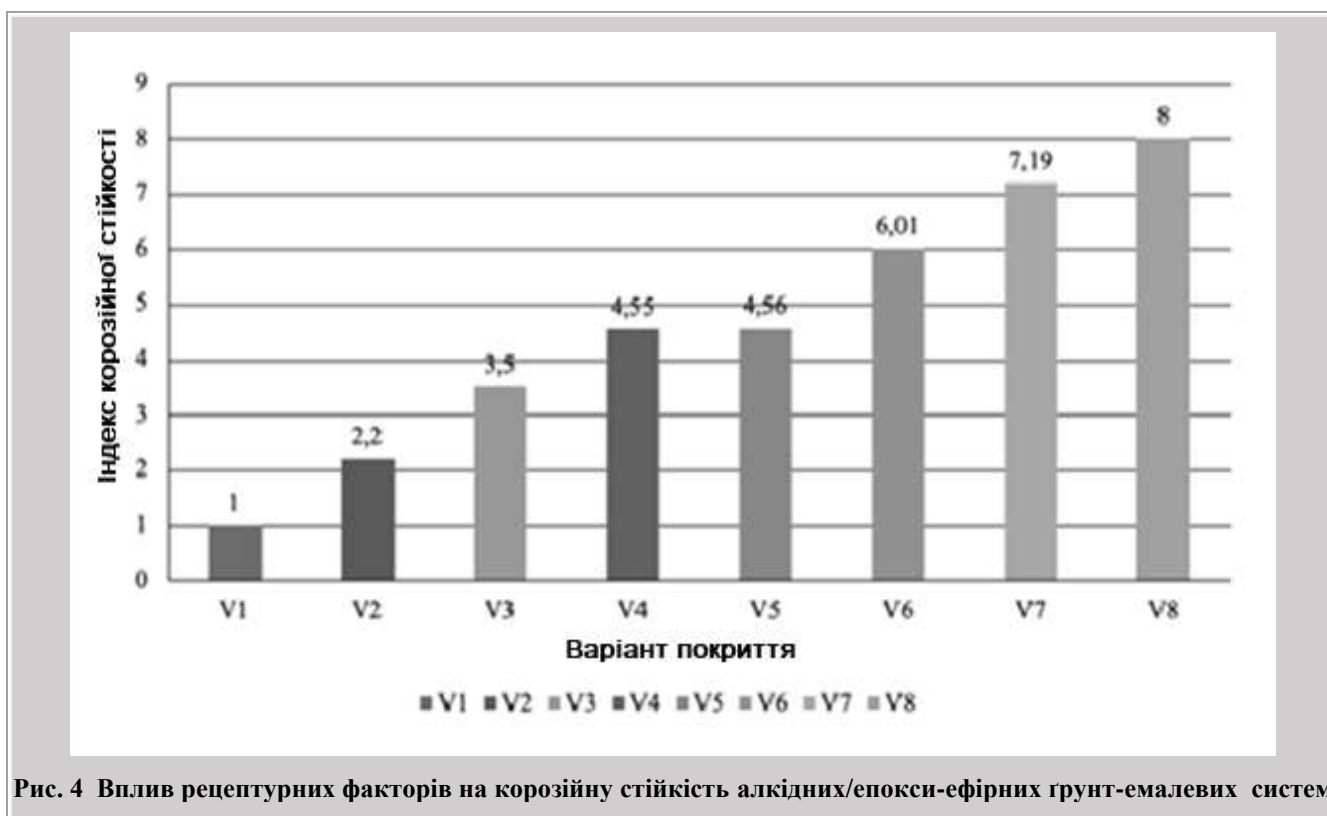


Рис. 4 Вплив рецептурних факторів на корозійну стійкість алкідних/епокси-ефірних ґрунт-емалевих систем

Тенденції корозійної стійкості, надані на рис. 4, вказують на систематичне підвищення захисних характеристик зі збільшенням вмісту фосфату цинку. Високофосфатні композиції постійно демонстрували затримку початку корозії, зменшення пошкодження поверхні та обмежене розшарування, підтверджуючи критичну роль пасивації на основі фосфатів та посилення бар'єру в алкіді/епокси-ефірних системах.

Органічні інгібітори корозії сприяли додатковому покращенню корозійної стійкості як низько-, так і ви-

сокофосфатних композицій. Варіанти, що містять інгібітори, продемонстрували затримку початку корозії та зменшення поширення корозії порівняно з аналогами без інгібіторів, що свідчить про ефективне пригнічення електрохімічних корозійних процесів на межі розділу метал-покриття.

Силанові промотори адгезії мали помітний вплив на корозійну стійкість підплівкових покриттів. Склади, що містять силановий модифікатор, демонструють зменшене розшарування та покращене утримання адгезії

після експозиції, особливо в системах з підвищеним вмістом фосфату цинку. Посилений міжфазний зв'язок обмежує бічне поширення корозії та підвищує загальну стабільність системи покриття в агресивних умовах.

Найвищої корозійної стійкості досягли композиції, що поєднували підвищений вміст фосфату цинку, додавання органічного інгібітору та силану для посилення адгезії. Ці системи продемонстрували найбільш сприятливий баланс між бар'єрною цілісністю, електрохімічним інгібуванням та міжфазною стабілізацією, що підкреслює синергетичну природу контрольованих рецептурою антикорозійних механізмів в алкідних/епокси-ефірних ґрунт-емалевих покриттях.

4. Обговорення

Перший і найбільш значущий рівень захисту в досліджуваних системах складається з ефектів, пов'язаних із бар'єрними властивостями. Вища концентрація фосфату цинку призводила до більшої товщини сухої плівки та меншої щільності дефектів, тим самим підвищуючи компактність покриття та запобігаючи проникненню електроліту. Ці структурні модифікації затримали початок корозії та зменшили кількість осередків її поширення. Отримані дані підтверджують ідею про те, що у випадку алкідних та епоксидно-ефірних систем із помірними власними бар'єрними характеристиками, зумовлене рецептурою збільшення як товщини плівки, так і її компактності є важливим для досягнення значущої корозійної стійкості [15].

Окрім впливу на структуру плівки, пігментація фосфатом цинку продемонструвала інгібуючий ефект на межі металу та покриття. Поєднання бар'єрної дії та ефекту пасивації пояснює значне покращення захисних властивостей у рецептурах із високим вмістом фосфату порівняно з базовими системами. Багатофункціональність фосфату цинку узгоджується з літературними даними, згідно з якими фосфатні пігменти не можна розглядати виключно як електрохімічні інгібітори, а радше як систему, що впливає на мікроструктуру покриття та його транспортні властивості [16].

Новий органічний інгібітор корозії забезпечив додатковий рівень захисту при додаванні до системи неорганічних пігментів. Експериментально визначене підвищення ефективності інгібіторів істотно не змінило товщину плівок або їхню адгезію до поверхні; це вказує на те, що основна роль даних добавок полягає в електрохімічному, а не структурному пригніченні корозії. Їхня ефективність була найбільш очевидною в рецептурах, які вже мали вищі бар'єрні властивості. Це означає, що властивості інгібіторів значною мірою залежать від архітектури покриття, що їх оточує. Дане спостереження підтверджує аргумент про те, що органічні інгібітори є вторинними захисними механізмами, які функціонують оптимально лише тоді, коли доступ електролітів до поверхні розділу вже певною мірою обмежений [17].

Міжфазна стабілізація відіграла вирішальну роль у запобіганні підплівковій корозії та збереженні адгезії після випробувань. Рецептури з модифікацією силаном завжди демонстрували менше відшарування та краще зчеплення порівняно з немодифікованими варіантами. Покращений міжфазний зв'язок мінімізував подальше поширення корозії після її початку, стабілізуючи таким чином характеристики покриття протягом усього періоду експозиції. Отримані результати узгоджуються з думкою про те, що посилення адгезії – це не просто механічне покращення, а визначальний фактор у прогресуванні корозійних пошкоджень органічних покриттів [18].

У технологічному аспекті отримані дані підтверджують важливість оптимізації складу алкідних та епокси-ефірних ґрунт-емалевих систем у промислових умовах. Хоча ці системи не досягнуть такої ж стійкості в корозійних середовищах, як притаманні повністю структурованим епоксидним покриттям бар'єрні властивості, їхні захисні характеристики можуть бути значно покращені завдяки стратегіям підбору рецептури. Спостережувані покращення мають кількісний характер, що підкреслює практичну значущість систематичного проектування складу порівняно з емпіричним підбором [19].

Отримані результати також демонструють, що оптимізація рецептури антикорозійних покриттів повинна розглядатися в ширшому контексті хімічної технології матеріалів та взаємозв'язку між структурою матеріалу і його експлуатаційними властивостями. Подібний підхід широко використовується у дослідженнях вуглецевих матеріалів, де показано, що зміна фізико-хімічного стану матеріалу, наприклад внаслідок окиснення, істотно впливає на його технологічні характеристики та подальшу поведінку в промислових процесах [20–24]. Дослідження, присвячені окисненню коксівного вугілля, продемонстрували, що навіть незначні зміни в хімічному складі або структурі органічної матриці можуть суттєво змінювати пластичні, реологічні та реакційні властивості матеріалу [20–22]. Подальші роботи підтвердили, що процеси окиснення призводять до модифікації петрографічної структури та функціональних груп вугілля, що безпосередньо впливає на його технологічні властивості та поведінку під час переробки [25, 26]. Аналогічна концепція взаємозв'язку між структурою, складом та експлуатаційними характеристиками застосовна і до систем антикорозійних покриттів, де мікроструктура плівки, взаємодія компонентів рецептури та міжфазні явища визначають довготривалу стабільність захисного шару. Більше того, сучасні дослідження з прогнозування властивостей вугілля та сумішей на основі їхніх хімічних і технологічних характеристик демонструють ефективність системного підходу до аналізу складних матеріалів [27, 28]. Такі підходи підтверджують важливість комплексного аналізу складу

матеріалу та його функціональних властивостей, що узгоджується з фундаментальними дослідженнями взаємозв'язку між хімічним складом і леткою складовою вугілля [29]. У цьому контексті результати даної роботи підтверджують, що системна оптимізація рецептури антикорозійних покриттів може бути розглянута як аналогічний підхід до керування структурно-функціональними властивостями матеріалів, де контроль складу та мікроструктури забезпечує прогнозовану експлуатаційну поведінку.

Висновки

1. Дане дослідження є кількісною систематичною оцінкою експлуатаційних характеристик антикорозійних рецептур для алкідних та епоксидних грунт-емалевих шарів покриття на сталевих основах. Детальна та точна узгодженість технологічних умов для всіх варіантів покриттів дозволила ізолювати роль хімічного складу рецептури та уможливила пряме чисельне порівняння систем у базових та оптимізованих умовах.

2. Результати виявляють, що синергетична дія бар'єрних властивостей, міжфазної стабільності та електрохімічного інгібування визначає антикорозійну ефективність алкідних та епоксидних покриттів. Висока концентрація фосфату цинку значно збільшила товщину та компактність плівки, що призвело до уповільнення проникнення електроліту та посилення бар'єрного захисту. Органічні інгібітори корозії працювали синергетично, пригнічуючи електрохімічну активність на межі розділу металів, а промотори адгезії на основі силану посилити міжфазний зв'язок і стримали подальший розвиток підплівкової корозії. Ці механізми працювали найкраще, коли були об'єднані в єдину рецептуру.

3. На практиці результати показують, що оптимізація рецептури шляхом цілеспрямованого врахування специфічних особливостей дозволяє досягти значного підвищення корозійної стійкості алкідних та епоксидних грунт-емалевих систем без зміни технології нанесення чи умов затвердіння. Це особливо стосується промислових ремонтних покриттів, де зручність нанесення, технологічна міцність та економічна доцільність є суттєвими. Було продемонстровано кількісні зміни періоду початку корозії, збереження адгезії та площі корозійного ураження, що забезпечує чудову основу для раціонального вибору складів та прогнозування їхньої ефективності в промислових умовах.

Бібліографічний список

1. Yan A., Xiao Y., Ren H., Lin B., Zhang H., Wang Y., Li X., Wang B., Tang J., (2025). Combining the life cycle model and corrosion model to analyze the impact of corrosion on carbon emissions of steel pipelines.

Environmental Impact Assessment Review, 115, 108027. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108027>.

2. Amaechi B., McGarrell B., Luong M., Okoye L., Gakunga P., (2021). Prevention of white spot lesions around orthodontic brackets using organoselenium-containing antimicrobial enamel surface sealant. *Heliyon*, 7(3), e06490. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06490>.

3. Das P., Devi N., (2025). Alkyd resins from *Argemone mexicana* seed oil: synthesis and characterization for use in anticorrosive coating applications. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 30(7), 815-833. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2025.2504559>.

4. Zhang Y., Chen T., Tong S., Zhou Y., Zhang Z., Chen J., Liu Q., Wang B., Chen F., (2026). NH₄⁺-doped flower-like zinc phosphate-reinforced waterborne epoxy coatings: structural characterization and corrosion protection. *Applied Surface Science*, 720(A), 165229. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.165229>.

5. Han S., Ke C., Wu Y., Yu B., Wang X., Wang L., Li D., Zhou F., Liu J., (2026). Bifunctional inhibitors of benzotriazole-loaded Ce-MOFs advanced anti-corrosion of epoxy coating. *Progress in Organic Coatings*, 213, 109952. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2026.109952>.

6. Trembecka-Wójciga K., Ortyl J., (2024). Enhancing 3D printed ceramic components: The function of dispersants, adhesion promoters, and surface-active agents in Photopolymerization-based additive manufacturing. *Advances in Colloid and Interface Science*, 332, 103251. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103251>.

7. Alamiery A., Shaker L., (2026). Smart and green corrosion inhibitors: Mechanisms, computational tools, and sustainable protection strategies. *Materials Chemistry and Physics*, 348(2), 131639. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131639>.

8. Li X., Zhou S., (2024). The anticorrosion behavior and mechanism of Ti₃C₂ nanosheets for titania pigmented epoxy coatings. *Progress in Organic Coatings*, 197, 108822. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108822>.

9. Barsana A., Nasar S., Umapathy M., (2025). Enhanced corrosion resistance of zinc phosphate coatings on mild steel through incorporation of nanocrystalline CeO₂ and CeO₂-CuO nanocomposite††Electronic supplementary information (ESI) available. *RSC Advances*, 15(26), 20916-20934. <https://doi.org/10.1039/d5ra02800k>.

10. Safir E., Ettahiri W., Boutaqqqa O., Lazrak J., Naamane S., Rais Z., Wiedmer S., Adardour M., Taleb M., (2026). Synthesis, characterization, and mechanistic insight into benzimidazole-based organic inhibitors for mild steel corrosion protection in acidic media. *Journal of Molecular Structure*, 1356, 145156. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.145156>

11. Pham V., Nguyen N., Pham K., Thai T., Pham T., Pham L., Vu O., Nguyen D., Tran L., Nguyen H., Le V.,

- (2024). One pot synthesis of amino silane grafted cerium phosphate (AS@CePO₄) as an effective anticorrosion nanopigment for epoxy coating. *Progress in Organic Coatings*, 192, 108480. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108480>.
12. Xiong G., Kang P., Zhang J., Li B., Yang J., Chen G., Zhou Z., Li Q., (2019). Improved adhesion, heat resistance, anticorrosion properties of epoxy resins/POSS/methyl phenyl silicone coatings. *Progress in Organic Coatings*, 135, 454-464. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.06.017>.
13. Huang X., Liu R., Li T., Li J., Wu H., Chen Y., Zhang Y., Yin Y., (2026). Integrated antifouling and anticorrosion fluorine-containing epoxidized soybean oil-based waterborne polyurethane coatings. *Progress in Organic Coatings*, 212, 109881. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109881>.
14. Yang S., Zhang Y., Zou Q., Jiang X., Jiang S., (2025). Non-destructive quantification of corrosion under coatings and evaluation of coating performance using terahertz time-domain spectroscopy. *Construction and Building Materials*, 501, 144251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144251>.
15. Hidalgo-Araujo A., Salomão R., Berardi U., Dornelles K., (2025). Design and characterization of a SiO₂-TiO₂ coating containing organic and inorganic thermochromic pigments and optimized with TiO₂-P25 for improved long-term performance in energy-efficient roofing. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 289, 113655. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113655>.
16. Zhou H., Deng W., Wang Q., Liang R., Wang D., (2025). Synergetic effect of passivity and hydrophobicity on the anticorrosion of magnesium phosphate cement-based coating on mild steel in Portland cement paste. *Construction and Building Materials*, 492, 143007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143007>.
17. Negi P., Chandra V., Kumar A., Kumar P., Priya, Yashmin K., Kumar N., Joshi N., Saxena R., Kumar A., Dhiman N., Rawat B., (2025). Plant-mediated synthesis of metal oxide nanocomposites: emerging prospects in electrochemical corrosion inhibition and biosensing. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 7, 100107. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100107>.
18. Tan Y., (2013). An overview of techniques for characterizing inhomogeneities in organic surface films and underfilm localized corrosion. *Progress in Organic Coatings*, 76(5), 791-803. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.02.001>.
19. Papavasileiou E., Rekkas D., Dallas P., Pispas S., Pippa N., (2026). Unlocking the potential of micelles: DoE and QbD strategies for formulation development and optimization. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 115(2), 107795. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2025.107795>.
20. Miroshnichenko D.V., Desna N.A., Kaftan Y.S. (2014). Oxidation of coal in industrial conditions. 2. Modification of the plastic and viscous properties on oxidation. *Coke and Chemistry*, 57, P.375-380. <https://doi.org/10.3103/S1068364X14100056>.
21. Miroshnichenko D. V., Drozdnyk Y. D., Kaftan Yu. S., Desna N. A., Holovko M. B. (2015). Oxidation of Pokrovskoe coal in laboratory and natural conditions. 1. Kinetics of oxidation and technological properties. *Coke and Chemistry*, 58, P. 79-87. <https://doi.org/10.3103/S1068364X15030059>.
22. Miroshnichenko D. V., Drozdnyk Y. D., Kaftan Yu. S., Desna N. A., Holovko M. B. (2015). Oxidation of Pokrovskoe coal in laboratory and natural conditions. 2. Expansion pressure. *Coke and Chemistry*, 10, P. 392-400. <https://doi.org/10.3103/S1068364X15100051>.
23. Miroshnichenko D. V., Drozdnyk Y. D., Kaftan Yu. S., Desna N. A. (2014). Assessment of the oxidation of coking coal. *Coke and Chemistry*, 5, P.153-162. <https://doi.org/10.3103/S1068364X14050068>.
24. Miroshnichenko D. V., Desna N. A., Drozdnyk Y. D. (2012). Influence of the oxidation of coal on the yield of coking products in the laboratory. *Coke and Chemistry*, 5, P. 167-176. <https://doi.org/10.3103/S1068364X12050067>.
25. Miroshnichenko D. V., Desna N. A. (2019). Petrographic Assessment of the Oxidation of Coking Coal. *Coke and Chemistry*, 4, P. 131-140. <https://doi.org/10.3103/S1068364X19040057>.
26. Miroshnichenko D. V., Desna N. A. (2019). Features of chemical composition and technological properties of oxidized coals. *International Journal of Coal Science & Technology*, 5 (4). P. 445-454. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0228-z>.
27. Miroshnichenko D. V., Desna N. A. (2024). Prediction of Volatile Matter Yield from Coals and Coal Blends. *Chemistry & Chemical Technology*, 18 (2). P 232-242. <https://doi.org/10.23939/chcht18.02.232>.
28. Miroshnichenko D. V., Desna N. A. (2023). Prediction of Coal Blends Properties Based on Their Genetic and Technological Characteristics. *Chemistry & Chemical Technology*, 17 (2). P. 357-369. <https://doi.org/10.23939/chcht17.02.357>.
29. Miroshnichenko D. V. (2011). Relationship between the volatile matter and the chemical composition of coal. *Coke and Chemistry*, 5, P.151-159. <https://doi.org/10.3103/S1068364X11050036>.

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-2-28-40

Specialty G1(161). U.D.C.: 67.01.97; 667.633

FORMULATION-DRIVEN OPTIMIZATION OF ALKYD / EPOXY-ESTER PRIMER-ENAMEL SYSTEMS FOR ENHANCED ANTICORROSION PERFORMANCE OF STEEL SUBSTRATES© S.L. Zharov¹, O.V. Kvasov²

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 61002, Kharkiv, 2 Kirpichova St., Ukraine

¹ Zharov Serhii L., Postgraduate Student of the Department of Oil, Gas and Solid Fuel Processing Technologies (TPNG and TP), ORCID: 0009-0007-0038-2802, e-mail: slzharov1977@gmail.com² Kvasov Oleksandr V., Postgraduate Student of the TPNG and TP, ORCID: 0009-0000-2948-692X, e-mail: 0099778@gmail.com

Alkyd and epoxy-ester primer-enamel systems continue to be popular as industrial corrosion protection of steel structures because they are technologically versatile, cost-effective, and can be used with familiar application equipment. Nevertheless, their anticorrosion properties are directly linked pigment loading, interfacial modification, and inhibitor functionality. The current research reports a logical experimental study on formulation-guided performance enhancement in the application of an alkyd /epoxy-ester-based primer-enamel coating over carbon steel surfaces. Eight standard coatings were prepared under the same technological conditions, differing in zinc phosphate concentration, the addition of organic corrosion inhibitors, and the application of silane-based adhesive promoters. Quality indicators, including dry-film thickness, adhesion (ISO 2409), defect density, and inhibitor efficacy, were assessed before exposure to corrosive conditions. The quantitative damage metrics of time to first visible corrosion, corroded surface area, delamination length, and adhesion retention were used to evaluate the post-exposure corrosion behavior. A relative corrosion resistance index was used to plot performance trends that are dependent on formulation. The findings indicate that formulation optimization results in significant, numerically measurable improvements in anticorrosion performance. Enhanced zinc phosphate loading also led to increased film build and barrier integrity with silane adhesion promoters, resulting in higher interfacial stability and under-film corrosion resistance. The optimized formulation showed a 2× delay in corrosion initiation compared to the baseline system, accompanied by a significant decrease in corroded surface area and delamination length. The results validate that, in alkyd/epoxy-ester systems, synergistic interactions that form a barrier, stabilize interfaces, and provide active inhibition result in effective anticorrosion protection. The results provide a technical formulation design for an industrial-level primer-enamel coating intended for use in a corrosion-resistant service environment.

This study is also relevant to the coke-chemical industry, where anticorrosion coating systems are widely applied to protect steel equipment used in coal processing, coking plants, and associated technological units operating in aggressive chemical environments.

Keywords alkyd coatings; epoxy-ester systems; anticorrosion primers; zinc phosphate pigment; silane adhesion promoters; organic corrosion inhibitors; coating formulation optimization.

Corresponding author S.L. Zharov, e-mail: slzharov1977@gmail.com

Manuscript received 2026/02/16

Accepted for publication 2026/03/30

Published 2026/04/17

This article is licensed under a CC BY 4.0 license

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-2-40-52

Спеціальність G1(161). УДК 667.633.2

ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ РЕГЕНЕРОВАНОГО МЕТИЛАЦЕТАТУ В ПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ ЕМАЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ УСТАНОВКИ ECO PLUS 122© В.В. Марченко¹, С.А. Набока²

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна

¹ Марченко Віктор Васильович, аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива (ТПНГ та ТП), ORCID 0009-0003-5287-5415, e-mail: 0997727@gmail.com

² Набока Сергій Андрійович, аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива (ТПНГ та ТП), ORCID 0009-0005-3632-997X, e-mail: naseanua@gmail.com

У статті проаналізовано технічну доцільність повторного використання регенованого метилацетату для виробництва промислової емалі та надано аналіз рівня забруднення та його впливу на ефективність регенерації, продуктивність фізико-хімічних реставрацій та покриттів-плівок. Регенерація та повторне використання органічних розчинників також актуальні для коксохімічних підприємств, де під час переробки вуглевидобувної продукції та покривних матеріалів утворюються значні обсяги відходів, що містять розчинники.

Розчинник був деградований промисловим способом; визначено п'ять різних рівнів забруднення (MXL0-MXL4), які відрізняються за вмістом і рівнем кислотності, вологості, щільності, кольору та нелеткого залишку. Регенерацію проводили на установці для термічної дистиляції ECO PLUS 122 за контрольованих робочих умов, які були налаштовані на низьку температуру кипіння і високий тиск метилацетату. Вихідна сировина та регенований розчинник (RMXL0-RMXL4) піддавалися вимірюванню ступеня очищення, а емалеві плівки, приготовані з використанням регенованого розчинника, були протестовані на блиск, твердість та поведінку при висиханні. Теплові характеристики циклу регенерації показали стійке плато температури пари при 55-60 °C, що свідчить про селективне випаровування складного ефіру. Вихід регенерації передбачувано знижувався: 93 % – найвищий і 81 % – найнижчий вихід регенерації в MXL0 і MXL4 відповідно. Тим не менш, відновлений розчинник мав відмінні фізико-хімічні показники: вміст складного ефіру становив 98,4-99,3 %, вміст води – менше 500 ppm, а кислотне число – не більше 0,11 мг KOH/г. Щільність, колір і нелеткий залишок були близькими до нормального метилацетату промислового класу, що свідчить про утримання гідролізованих і висококиплячих домішок у випарнику. Характеристики емалевих плівок також були однаковими у всіх регенованих зразках: блиск не змінювався в межах 1-5 одиниць, твердість за шкалою НВ не відхилялася більше ніж на 1-2 одиниці, а час висихання становив 39-45 хв. Ці результати підтверджують, що регенований метилацетат зберіг функціональні якості, необхідні для виробництва емалей, незважаючи на використання дуже забрудненої сировини. Отримані результати обґрунтовують технологічну та екологічну доцільність використання систем регенерації розчинників, таких як ECO PLUS 122, у виробництві лакофарбової продукції.

Ключові слова: коксохімічне виробництво; метилацетат; регенерація розчинника; фізико-хімічні властивості; ефективність дистиляції; якість покриття-плівки

Автор для листування В.В. Марченко e-mail: 0997727@gmail.com

Рукопис надійшов до редакції 16.02.2026

Прийнято до публікації 30.03.2026

Опубліковано 17.04.2026 Ця стаття ліцензується відповідно до міжнародної ліцензії CC BY 4.0

1. Вступ

Метилацетат є однією зі сполук, які знайшли широке застосування у виробництві промислових емалей завдяки своїй здатності до випаровування, сумісності з традиційними сполучними хімічними речовинами та меншому впливу на навколишнє середовище, ніж традиційні ароматичні вуглеводні [1].

У коксохімічному виробництві широкий спектр кисневмісних органічних сполук та розчинників використовуються в процесі переробки кам'яновугільної смоли, ароматичних вуглеводнів та покривних матеріалів, що використовуються для захисту від корозії металургійного обладнання. Розчинники, такі як ефіри, кетони та спирти, застосовуються в операціях очищення, процедурах екстракції та приготуванні захисних покриттів, що використовуються в коксових печах та допоміжних хімічних агрегатах.

Незважаючи на переваги, промислове використання метилацетату схильне до постійної ерозії внаслідок хімічної деградації. Волога та каталітичні компоненти, доступні для емалевих систем, ініціюють гідроліз, що призводить до утворення кислотних побічних продуктів та зменшення кількості ефіру, змінюючи розчинну здатність та

стабільність розчинника [2]. Крім того, препарат має високу гігроскопічність, а отже може поглинати велику кількість води при зберіганні та переробці. Ця волога посилює гідроліз і дестабілізацію пігментів, а повторний вплив на смоли та пігменти призводить до розчинення полімерних фрагментів, кольорових тіл і нелетких залишків [3].

Коксохімічні заводи та вугільно-хімічні підприємства утворюють значні обсяги відходів, що містять розчинники, під час технічного обслуговування, виробництва покриттів та хімічної обробки. Накопичення деградованих розчинників призводить до збільшення експлуатаційних витрат та навантаження на навколишнє середовище, зокрема через наявність летких органічних сполук (ЛОС) та кисневмісних органічних речовин.

З виробничої точки зору, бідніший розчинник призводить до зниження ефективності виробництва, збільшення браку та збільшення обсягів забруднених відходів, які необхідно утилізувати. Ці наслідки є комбінаторним наслідком зростаючого інтересу до технологій регенерації розчинників, які здатні скоротити потоки промислових відходів і відновити якість розчинників до рівня, придатного для повторного використання [4].

Ефективність регенерації кетонів, спиртів та ароматичних розчинників була описана в численних дослідженнях, які показали, що сучасні дистиляційні установки можуть досягати високого ступеня регенерації, якщо процес відбувається при постійному температурному градієнті і регульованих режимах конденсації [5]. Тим не менш, для метилацетату доступно набагато менше даних. Література здебільшого присвячена кінетиці великомасштабного гідролізу або загальній поведінці дистиляції без вимірювання виходу регенерації, фізико-хімічного відновлення та впливу регенованого розчинника на майбутні характеристики покриттів і плівок [6]. Для того, щоб заповнити ці прогалини, в даному дослідженні детально проаналізовано регенерацію метилацетату в присутності промислових забруднень. Метою цього дослідження є визначення ефективності регенерації при різних рівнях забруднення, ступеня фізико-хімічного відновлення, а також життєздатності використання регенованого метилацетату для повторного використання емалі в промисловості.

Дослідження вибору розчинників показують тенденцію до використання складних ефірів, таких як метилацетат, оскільки вони швидко випаровуються і можуть бути використані в поєднанні з алкідними та акриловими сполучними системами [7]. Фізико-хімічна стабільність розчинників на основі складних ефірів була детально вивчена і показала, що метилацетат поводить себе зовсім інакше, ніж розчинники з вищими температурами кипіння, наприклад, оксигенати. Дослідження механізму процесів гідролізу естерів довели, що метилаце-

тат може швидко розкладатися в присутності вологи і залишків каталізатора, що призводить до зменшення вмісту естерів, підвищення кислотності і утворення летких побічних продуктів, які впливають на поведінку при випаровуванні [8].

Деякі з авторів досліджували шляхи забруднення розчинників, що використовуються у виробництві емалей, повідомляючи, що багаторазовий контакт зі смолою, пігментами та полімерними добавками призводить до розчинення нелетких фрагментів і накопичення як органічних, так і неорганічних забруднювачів. Всі ці дослідження показують поступове зростання кольору, щільності, поглинання нелетких залишків, поглинання вологи зі збільшенням ступеня забруднення [9].

Згідно з повідомленнями про емалеві системи, чистота розчинників може впливати на розвиток блиску, вирівнювання поверхонь, швидкість і прогрес твердості, причому навіть незначні варіації фізико-хімічних показників можуть спричинити відхилення у всіх виробничих партіях [10]. Отримані дані підтверджують аргумент, що цілісність розчинника є важливим аспектом у забезпеченні стабільної якості продукту і відсутності нестабільності виробництва.

Велика кількість органічних розчинників, таких як кетони, спирти та ароматичні вуглеводні, були випробувані в термічних регенераційних процесах, особливо в атмосферній і вакуумній дистиляції. Як показують численні дослідження, ретельно контрольоване термічне розділення може бути ефективно використане для відновлення властивостей випаровування і розчинності у випадках, коли профіль нагрівання і контроль залишків суворо контролюються [11].

Хоча дистиляція довела свою ефективність у загальній регенерації розчинників, різні звіти вказують на низку проблем, пов'язаних з високолеткими, низькокиплячими розчинниками. Дослідження складних ефірів та інших низькокиплячих органічних сполук показують, що вони мають високий тиск пари. Це робить їх більш чутливими до захоплення, композиційної нестабільності та перенесення вологи при регенерації. Селективне випаровування з мінімальними втратами розчинника повинно досягатися більш жорстким контролем температури і більшою ефективністю конденсатора, особливо при використанні сировини з високим вмістом домішок [12].

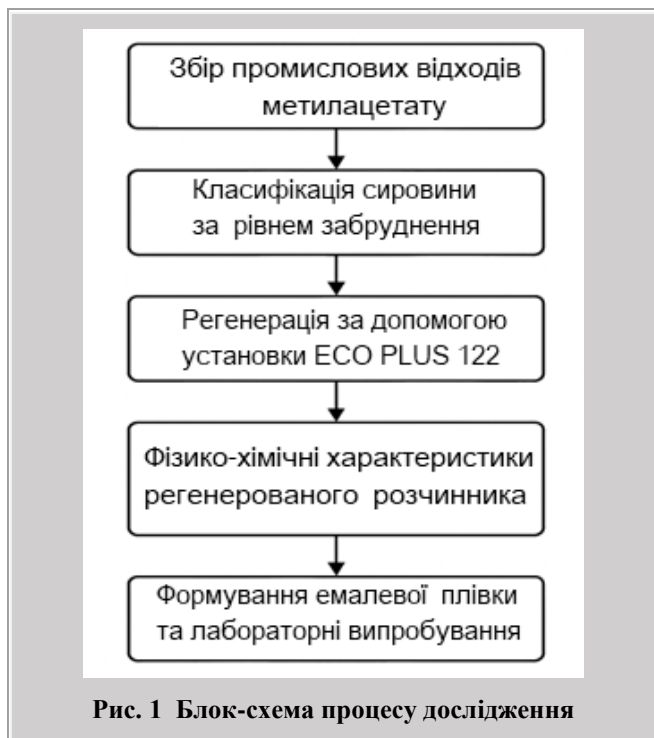
Незважаючи на велику кількість літератури з регенерації розчинників, існує мало досліджень на підтримку використання метилацетату для регенерації розчинників. Існує ще менше звітів щодо тестування продуктивності покриттів-плівок, які використовують регенований метилацетат, а знання про поведінку регенованого розчинника в активних емалевих системах залишаються значною мірою прогалинами [13]. Ці прогалини перешкоджають виробникам приймати з високим

ступенем впевненості стратегії регенерації та оцінювати, чи здатен регенований метилацетат надійно замінити свіжий розчинник.

2. Методологія

2.1. Загальний робочий процес дослідження

На рис. 1 представлено повний робочий процес, прийнятий у цьому дослідженні, що охоплює всі етапи від отримання забрудненого розчинника до остаточної порівняльної оцінки характеристик емалі.



Робочий процес відображає замкнутий аналітичний цикл, що складається з: (1) збору промислових відходів метилацетату; (2) класифікації сировини за рівнями

забруднення; (3) регенерації на установці ECO PLUS 122; (4) фізико-хімічної характеристики регенованого розчинника; (5) формування рецептури емалевої плівки та лабораторних випробувань.

2.2. Підготовка сировини та ступінь забруднення

Забруднений метилацетат було зібрано з промислових виробництв емалей, де розчинник багаторазово використовується для розчинення смол, промивання обладнання та контролю в'язкості. Перед регенерацією сировину витримували протягом 12 годин для гравітаційного осадження грубих смолистих речовин, після чого проводили фільтрацію під низьким тиском через 25-мікронну сітку для видалення макрочастинок без зміни хімічного складу. Жодних сушильних агентів або стабілізаторів не додавали.

У табл. 1 наведено кількісні показники, що використовуються для класифікації, зокрема колір, кислотне число, вміст складних ефірів, вологість, нелеткий залишок і густина.

Показники, представлені в табл. 1, відображають прогресуюче погіршення якості метилацетату під час багаторазового промислового використання. Зростання ступеня забруднення від MXL0 до MXL4 характеризується систематичним зростанням кислотного числа, вмісту води, нелетких залишків і густини, що супроводжується збільшенням інтенсивності забарвлення і зменшенням вмісту складних ефірів. Спостережувані зміни кольору свідчать про накопичення хромофорних фрагментів деструкції та залишків розчиненої смоли. Підвищення кислотного числа свідчить про інтенсифікацію гідролізу складних ефірів, що характерно для окисненованих розчинників під час тривалого контакту з вологою та каталітичними компонентами фарби. Зменшення вмісту складних ефірів відображає цей процес гідролізу і безпосередньо впливає на розчинну здатність розчинника.

Таблиця 1

Кількісні показники для класифікації забрудненого метилацетату (MXL0-MXL4)

Показник	Ступінь забруднення метилацетату				
	MXL0 (Низький)	MXL1 (Помірний)	MXL2 (Помірно-високий)	MXL3 (Високий)	MXL4 (Дуже високий)
Колір (Pt-Co)	10-12	12-16	16-20	20-24	24-30
Кислотне число, мг КОН/г	0,04-0,05	0,05-0,07	0,07-0,09	0,09-0,11	0,11-0,13
Вміст етерів, %	99,0-99,3	98,7-99,1	98,3-98,9	97,8-98,5	97,2-98,0
Волога, ppm	180-250	250-350	350-500	500-800	800-1200
Нелеткий залишок, %	0,04-0,06	0,06-0,08	0,08-0,12	0,12-0,18	0,18-0,26
Густина, г/см ³	0,932-0,933	0,933-0,934	0,934-0,935	0,935-0,936	0,936-0,937

2.3. Експериментальна установка та порядок роботи

Регенерацію проводили на термодистиляційній установці ECO PLUS 122, схематична конфігурація якої представлена на рис. 2. Система включає випарну посудину з нержавіючої сталі з термоізованою масляною рубашкою, лінію передачі пари з контрольованою геометрією, спроектовану для мінімізації уловлювання,

конденсатор з водяним охолодженням і герметичну камеру для збору дистиляту. На відміну від ароматичних розчинників, метилацетат має значно нижчу температуру кипіння ($56,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) і вищий тиск парів, тому робочі параметри були адаптовані таким чином, щоб запобігти втратам розчинника, надмірним стрибкам тиску і захопленню висококиплячих домішок.

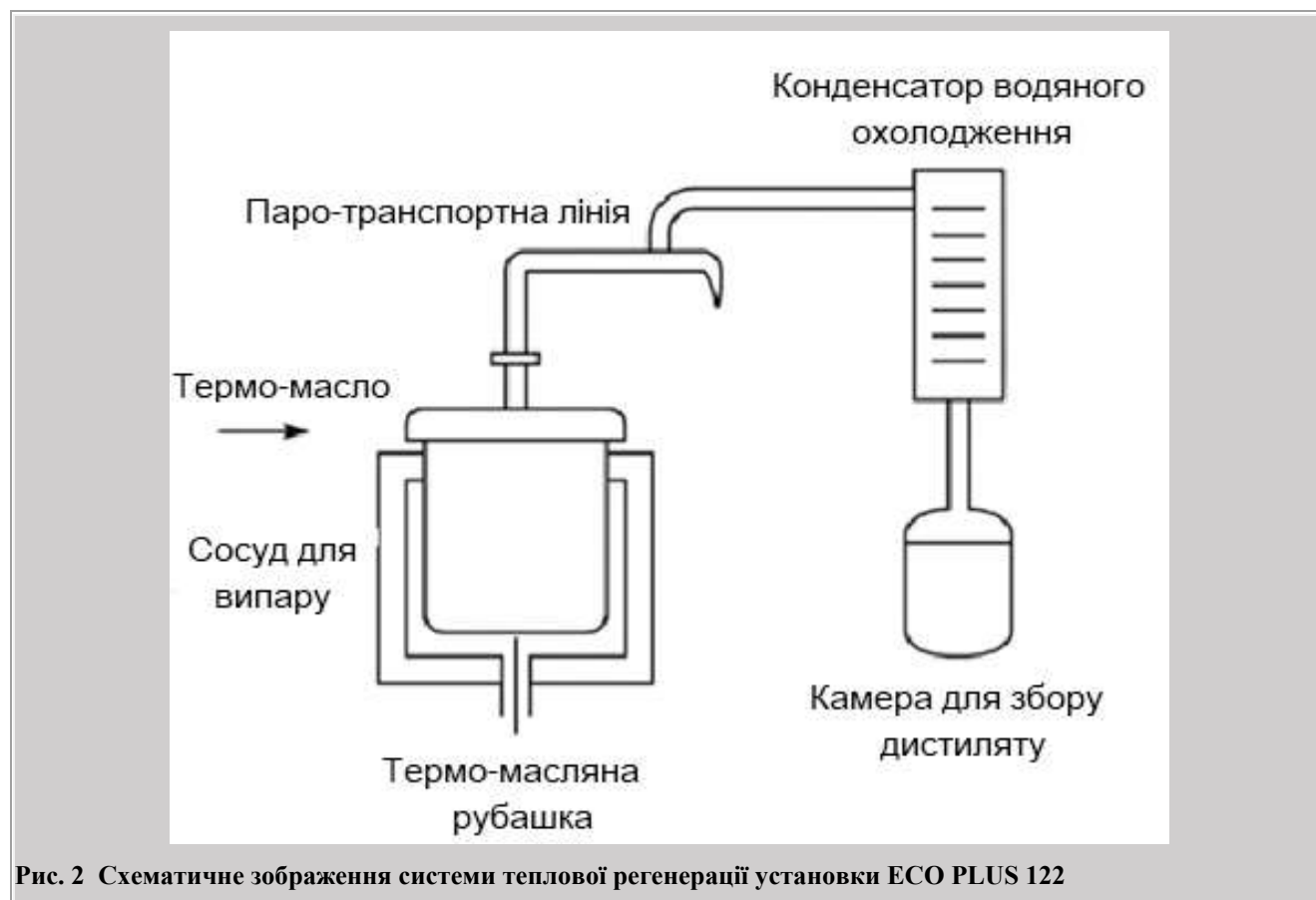


Рис. 2 Схематичне зображення системи теплової регенерації установки ECO PLUS 122

Щоб доповнити схему, показану на рис. 2, на рис. 3 представлено фотографію установки ECO PLUS 122.

Як показано на рис. 3, система складається з випарної ємності з нержавіючої сталі, що обігривається термальним маслом, верхнього завантажувального бака, лінії передачі пари, модуля конденсації з водяним охолодженням і герметичного збірного барабана, розташованого під випускним отвором.

Як показано в табл. 2, обране робоче вікно забезпечує стабільне випаровування метилацетату та ефектив-

не утримання нелетких залишків у випарній посудині. Температуру гріючого масла підтримували між 70 і $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ для забезпечення контрольованого випаровування, а температуру пари стабілізували між 55 і $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає початку стаціонарного кипіння. Температуру конденсатора підтримували в діапазоні 10 - $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ для досягнення ефективної конденсації низькокиплячих парів. Всі цикли працювали при постійному об'ємі та часі, щоб забезпечити пряму порівнянність ефективності регенерації для різних рівнів забруднення.



Рис. 3 Фото терморегенераційної установки ECO PLUS 122

Таблиця 2

Робочі параметри процесу регенерації метилацетату ECO PLUS 122

Параметр	Значення	Пояснення
Об'єм випарної ємності	150 л	Об'єм робочої камери
Температура масла для нагріву	70-95 °С	Температура, необхідна для ініціювання та стабілізації кипіння метилацетату
Температура парів	55-60 °С	Характеристика порогу кипіння для складних етерів
Температура конденсації	10-18 °С	Необхідна для конденсації парів низькокиплячих складних ефірів
Тривалість циклу	160 хв.	Загальна послідовність нагрівання-випаровування-конденсація
Середній об'єм регенерата	11,0-11,7 л	Чистий дистиллят, зібраний за цикл
Залишок в ємності	0,8-2,3 кг	Маса нелеткого смолистого матеріалу
Режим циркуляції термомасла	Замкнутий цикл	Забезпечує рівномірний розподіл тепла

2.4. Розрахунок виходу регенерації та ефективності очищення

Вихід регенерації розраховували за допомогою рівняння:

$$Y = \frac{m_{reg}}{m_{feed}} \times 100, \quad (1)$$

де Y – вихід регенерації (%), m_{reg} – маса регенованого метилацетату, отриманого в кінці циклу (кг), m_{feed} – початкова маса забрудненої сировини, що

завантажується у випарник (кг). Ефективність очищення за кожним фізико-хімічним параметром визначали за допомогою рівняння:

$$E = \frac{P_{feed} - P_{reg}}{P_{feed}} \times 100, \quad (2)$$

де P_{feed} і P_{reg} позначають значення певного пара-

метра (наприклад, кислотного числа, вмісту складних ефірів, вологи або нелеткого залишку) у забрудненій вихідній сировині та регенованому розчиннику відповідно. Відносні відмінності в експлуатаційних характеристиках емалевих плівок, виготовлених на основі регенованого та стандартного метилацетату, оцінювали за допомогою рівняння:

$$D = \frac{F_{reg} - F_{std}}{F_{std}} \times 100, \quad (3)$$

де F_{reg} і F_{std} представляють значення показників

ефективності покриття-плівки (блиск, твердість або час

висихання), отримані з регенованим і стандартним розчинником відповідно.

2.5. Фізико-хімічна характеристика регенованого метилацетату

Регенований метилацетат був охарактеризований за допомогою комплексного набору фізико-хімічних показників, які визначають його придатність для виготовлення емалей. Параметри включали вміст складних ефірів (ГХ-ФІД), концентрацію вологи (титрування за Карлом Фішером), кислотне число (потенціометричне титрування відповідно до ISO 660), густину (пікнометричний метод при 20 °С), кольоровий показник (шкала Pt-Co, ISO 6271-2) та нелеткий залишок (випаровування при 105 °С з визначенням балансу маси).

3. Результати

3.1 Теплові характеристики та ефективність дистиляції

На рис. 4 представлено тепловий профіль, записаний під час репрезентативного циклу регенерації, проведеного на системі ECO PLUS 122.

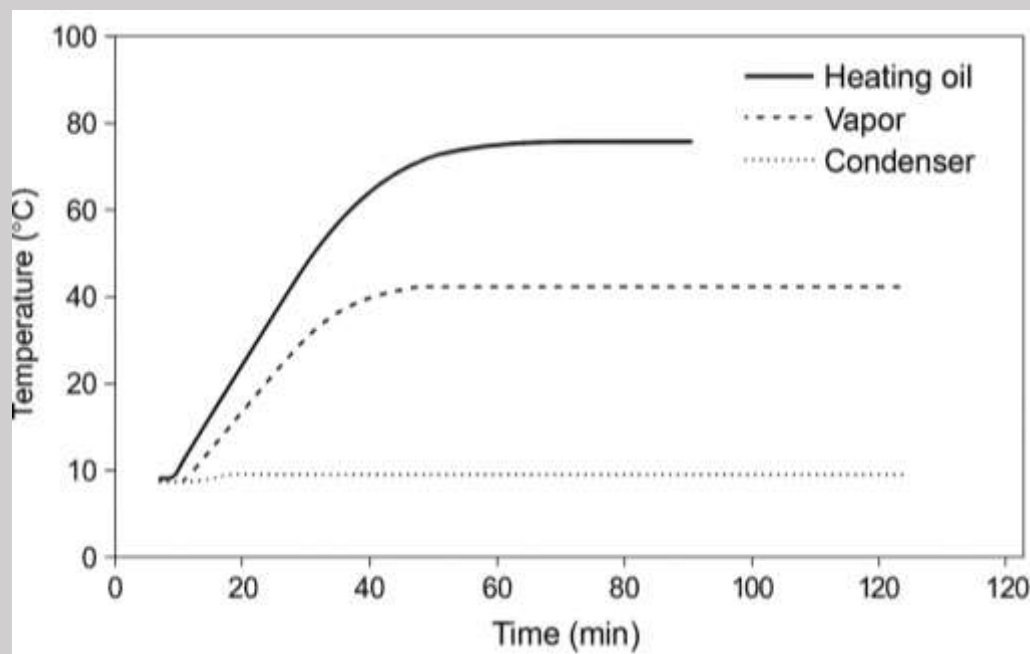


Рис 4 Тепловий профіль циклу регенерації метилацетату

Температура грючої олії плавно зростала до 70-95 °С, створюючи необхідний температурний градієнт для випаровування складних ефірів. Крива «паратемпература» демонструє початкове коливання, пов'язане з видаленням вологи, за яким слідує чітко виражене плато між 55 і 60 °С, що відповідає характерному

інтервалу кипіння метилацетату. Це плато вказує на стабільне випаровування з незначним захопленням висококиплячих домішок. Температура конденсатора залишалася в діапазоні від 10 до 18 °С, забезпечуючи ефективну конденсацію парів і запобігаючи втратам розчинника. Комбінована температурна поведінка підт-

верджує, що робоче вікно, вибране в цьому дослідженні, забезпечує постійну термічну стабільність протягом усього циклу регенерації, що є важливим для точної інтерпретації виходу та фізико-хімічних властивостей регенерату.

3.2. Вихід регенерату

У табл. 3 наведено результати регенерації, отримані для різних рівнів забруднення MXL0-MXL4.

Вихід регенерату демонстрував чітку зворотну кореляцію зі ступенем забруднення. Найвищі значення виходу (90-93 %) були отримані для слабо забрудненої сировини (MXL0-MXL1), що свідчить про мінімальне утворення нелетких залишків. На відміну від цього, сильно забруднена сировина (MXL3-MXL4) призводила до збільшення утримання смолистого і гідролізова-

ного матеріалу у випарній ємності (до 2,3 кг), тим самим знижуючи вихід до 81-84 %. Ці результати узгоджуються з принципами балансу маси, описаними в рівнянні (1), і підтверджують передбачувану поведінку естерних розчинників під час термічної регенерації.

З кількісної точки зору, зменшення виходу регенерату з 93 % на MXL0 до 81 % на MXL4 відповідає відносному зменшенню приблизно на 12,9 %. Це зниження є помірним у порівнянні зі значним збільшенням маси нелетких залишків, що накопичуються у випарнику при більш високих рівнях забруднення. Крім того, в колонці інтерпретації табл. 3 підкреслюється, що домінуючою причиною зниження виходу є зростання смолистих і гідролізованих фракцій, які залишаються в апараті після кожного циклу.

Таблиця 3

Вихід регенованого метилацетату за різного ступеня забруднення

Цикл	Ступінь забруднення метилацетату	Вихід регенерату (%)	Інтерпретація
1	MXL0 (Низький)	93	Мінімальне навантаження на залишки; ефективне розділення складних ефірів
2	MXL1 (Помірний)	90	Дещо підвищений вміст вологи та смоли зменшує відновлення
3	MXL2 (Помірно-високий)	87	Збільшення нелеткого залишку, що залишається під час дистиляції
4	MXL3 (Високий)	84	Значне накопичення гідролізованих фрагментів знижує вихід
5	MXL4 (Дуже високий)	81	Важкий смолистий залишок обмежує вихід дистилляту

3.3. Фізико-хімічні властивості регенованого метилацетату

У табл. 4 наведено фізико-хімічні показники регенованого метилацетату (RMLX0-RMLX4) відносно стандартного промислового розчинника.

Табл. 4 демонструє, що процес регенерації ефективно відновлює основні фізико-хімічні властивості метилацетату на всіх рівнях забруднення. Вміст складних ефірів залишається високим у всіх регенованих зразках (98,4-99,3 %), що підтверджує, що гідролізовані та оксигеновані фрагменти були успішно видалені під час дистиляції. Вологість помірно зростає з підвищенням початкового рівня забруднення, але залишається в межах допустимих норм для емалевих плівок, що свідчить про те, що ефективність конденсатора і відділення парів підтримувалися протягом усіх циклів регенерації.

Значення кислотності незначно зростає від RMLX0 до RMLX4, залишаючись достатньо низьким, щоб за-

побігти дестабілізації розчинів смол і забезпечити хімічну сумісність з емалевими сполучними речовинами. Значення нелетких залишків також помірно зростає зі збільшенням рівня забруднення, що відображає передбачувану поведінку, пов'язану з кількістю термічних залишків, що утримуються у випарнику; проте навіть найвищі значення залишаються прийнятними для повторного використання в промислових рецептурах.

Густина відновлюється до значень, близьких до густини стандартного метилацетату, що свідчить про те, що в дистилат не потрапили важкі оксигеновані побічні продукти або полімерні фрагменти. Значення кольору значно знижуються порівняно з вихідною сировиною (табл. 1), демонструючи, що хромофорні домішки ефективно утримуються під час випарювання, особливо при високих рівнях забруднення.

Таблиця 4

Фізико-хімічні показники регенованого метилацетату (RМXL0-RМXL4) у порівнянні зі стандартним промисловим метилацетатом

Показник	Стандарт	RМXL0	RМXL1	RМXL2	RМXL3	RМXL4
Колір (Pt-Co)	10	12	14	16	18	22
Кислотне число, мг КОН/г	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09	0,11
Вміст етерів, %	99,5	99,3	99,1	98,9	98,7	98,4
Волога, ppm	180	220	260	320	390	470
Нелеткий залишок, %	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09	0,11
Густина, г/см ³	0,932	0,932	0,933	0,933	0,934	0,934

3.4. Ефективність емалевих плівок, приготованих на регенованому розчиннику

У табл. 5 наведено показники ефективності покриття, отримані для емалевих плівок, виготовлених з використанням регенованого метилацетату.

Табл. 5 демонструє, що характеристики емалевої плівки залишалися стабільними для всіх регенованих зразків. Значення блиску RМXL0-RМXL4 відрізнялися від стандарту не більше ніж на 1-5 одиниць блиску. Це підтверджує, що залишкові домішки, присутні після регенерації, суттєво не впливають на відбивну здатність

поверхні. Значення твердості залишалися у вузькому діапазоні, що свідчить про послідовне розчинення смоли і достатню коалесценцію плівки. Тривалість висихання показала очікувану поведінку: плівки, виготовлені на основі RМXL0-RМXL2, висихали трохи швидше через дещо вищу летючість, тоді як RМXL3-RМXL4 демонстрували дещо довший період висихання, що узгоджується з підвищеним вмістом нелетких залишків. Всі відхилення залишалися в межах промислово прийнятних допусків.

Таблиця 5

Ефективність емалевих плівок, приготованих з регенованим та стандартним метилацетатом

Показник	Стандарт	RМXL0	RМXL1	RМXL2	RМXL3	RМXL4
Блиск, 60°	87	86	85	84	83	82
Твердість, НВ од.	28	28	27	27	26	26
Тривалість висихання, хв.	42	39	40	41	43	45

Дані про твердість і тривалість висихання дають додаткове уявлення про взаємозв'язок між чистотою розчинника і характеристиками покриття. Невелике зниження твердості НВ з 28 до 26 одиниць і незначне збільшення тривалості висихання з 42 до 45 хвилин для RМXL4 свідчать про те, що підвищений вміст нелетких залишків і вологи дещо сповільнює кінетику вивільнення розчинника і зшивання, але не перешкоджає створенню механічно міцних плівок. У свою чергу, дещо швидше висихання RМXL0-RМXL2 порівняно зі стандартом може відображати ледь помітний зсув у бік більш легкого дистиляційного зрізу. Важливо, що жодна з цих варіацій не вийшла за межі діапазонів допусків, що використовуються в рутинному контролі якості емалевих виробів. Таким чином, результати, представлені в табл. 5, демонструють, що з точки зору кінцевого використання регенований метилацетат поводить себе як функціонально еквівалентний розчинник для свіжого матеріалу в усьому діапазоні досліджуваних рівнів забруднення.

4. Обговорення

Результати цього дослідження доводять, що регенерацію та повторне використання метилацетату у виробництві емалей можливо здійснити навіть з використанням розчинника, отриманого з промислової сировини дуже низької якості. П'ять рівнів забруднення, на які було класифіковано забруднений метилацетат, запропонували систематичну основу оцінки ефективності, з якою рівень деградації визначає результати процесу регенерації. Таким чином, стало можливим дослідити поведінку розчинника в реальних умовах виробництва, що дозволило додатково оцінити потенціал повторного використання розчинника на практиці для підвищення його ефективності.

Тепловий профіль, знятий в процесі регенерації, вказує на те, що установка ECO PLUS 122 здатна підтримувати режим випаровування-конденсації на низькокиплячих розчинниках ефірної природи. Наявність температурного порогу пари при 55-60 °С, а також ре-

гулювання температури масла-нагрівача і конденсатора показали, що селективне випаровування складних ефірів можливе без значних втрат на винос і термічної нестабільності. Це дуже важливо, коли використовуються такі розчинники, як метилацетат, які мають високий тиск пари і тому не можуть ефективно конденсуватися в іншому випадку [14].

Вихід регенерату послідовно зменшувався від 93 до 81 % зі збільшенням рівня забруднення між MXL0 і MXL4. Така поведінка узгоджується з очікуваннями масового балансу, оскільки зі збільшенням ступеня розкладання сировини зростає також частка нелетких залишків, які не потрапляють у потік дистилату. Фазовий поділ підтверджується тим фактом, що висококиплячі забруднення залишаються в залишковій стадії, а також тим, що регенерація є економічно вигідною навіть у випадку високих рівнів забруднення [15].

Відновлення широкого спектру фізико-хімічних властивостей регенованих зразків вказує на те, що термічна дистиляція дозволяє зберегти вміст складного ефіру, вологість, кислотність, густину і нелеткий залишок до рівнів, які відповідають стандартному промислому метилацетату. Коли вміст складного ефіру перевищує 98,4 % у всіх регенованих партіях, це свідчить про ефективне видалення гідролізованих фрагментів. Рівень вологи підтримувався досить низьким, щоб уникнути дестабілізації пігментів і несумісності смол, а також низький рівень кислотності, щоб зупинити передчасну взаємодію ефіру зі сполучником. Сукупний ефект цих відновлених властивостей свідчить про те, що регенований метилацетат можна використовувати як ефективне покриття.

Регенерація додатково підтверджується експлуатаційними характеристиками емалевих плівок, виготовлених з використанням регенованого розчинника. Блиск, твердість і час висихання були в межах близьких і промислово прийнятних шкал на всіх рівнях забруднення з невеликими варіаціями на найвищих класах забруднення. Сталість параметрів плівкоутворення свідчить про те, що регенований метилацетат все ще має достатню розчинність і контрольовану поведінку при випаровуванні, щоб підтримувати однорідне утворення покриття-плівки. Така залежність чистоти розчинника і характеристик покриття від принципів взаємодії розчинника і сполучника та механізму випаровування узгоджується з попередніми твердженнями [16].

На основі промислових операцій, високий вихід регенерації та потужне фізико-хімічне відновлення вказують на те, що метилацетат є гарним кандидатом для використання в системах замкнутого циклу управління розчинниками. Замінюючи частину свіжого розчинника регенованим, можна заощадити значні кошти на закупівлю та обмежити кількість небезпечних відходів, а також це може бути більш економічною та екологічною

вигідною практикою у виробництві емалей у великих кількостях. [17].

Незважаючи на те, що процес регенерації був успішним при всіх рівнях забруднення, слід звернути увагу на деякі тенденції для оптимізації процесу. Зростання кислотності та вологості зі збільшенням рівня забруднення, хоча і не є шкідливим в даному випадку, але вказує на те, що дуже тривалі цикли використання розчинників можуть в кінцевому підсумку призвести до отримання сировини, яка межує з прийнятною поведінкою регенерації. У таких ситуаціях для підтримання стабільності розчинників у довгостроковій перспективі можна застосовувати попередню фільтрацію, сушіння в потоці або змінювати профілі нагрівання. Ці висновки особливо актуальні для установок, що працюють під великим виробничим навантаженням, або установок з високореактивними системами сполучних речовин [18].

Нарешті, незважаючи на те, що це дослідження пропонує солідну базу даних про регенерацію метилацетату на установці ECO PLUS 122, додаткові дослідження альтернативних рецептур емалей, виробничих потужностей і процесів дистиляції підвищили б загальну застосовність отриманих результатів. Хімічні відмінності між сполучними речовинами, пігментами або реакціями розчинників можуть спричинити різницю в рівнях регенованого метилацетату, і тестування цих параметрів допомогло б посилити експлуатаційні параметри. Однак наведені результати чітко показують, що відповідальний регенований метилацетат можна з упевненістю повторно вводити в цикли виробництва емалі, і це не призведе до погіршення якості покриття.

Висновки

1. У цій дослідницькій роботі було проведено ретельну оцінку регенерації метилацетату при реалістичних промислових рівнях забруднення і показано, що розчинник може бути успішно відновлений для повторного використання у виробництві емалей. Вихід регенерації передбачувано і контрольовано знижувався від 93 до 81 відсотка від MXL0 до MXL4, що свідчить про зростання вмісту нелетких і висококиплячих залишків у більш деградованому матеріалі. Хоча це знизило вихід, процес регенерації забезпечив хороше фізико-хімічне відновлення за всіма категоріями: вміст складних ефірів не опускався нижче 98,4-99,3, вологість не перевищувала 500 ppm, кислотне число було низьким, нижче 0,11 мг КОН/г, а густина, колір і нелеткий залишок були близькими до значень стандартного промислового метилацетату. Ці результати підтверджують, що гідролізовані фрагменти, волога і смолисті домішки ефективно видаляються в процесі дистиляції і, таким чином, відновлений розчинник задовольняє основним критеріям якості для використання в рецептурі.

2. Якість емалевих плівок, сформованих після обробки регенованим метилацетатом, також підтвердила

придатність регенованого розчинника для використання в промисловості. Коливання блиску не перевищувало 1-5 одиниць, твердості – 1-2 одиниці за шкалою НВ, а тривалість висихання знаходилась в межах 39-45 хвилин. Це свідчить, що регенований розчинник має стабільну випаровуваність і достатню розчинність для розчинення смоли, а також для підтримання рівномірної динаміки плівкоутворення.

3. Доведено технологічну доцільність регенерації метилацетату як частини замкненої системи управління розчинниками, що дозволяє виробникам мінімізувати використання свіжого розчинника, виробництво небезпечних відходів та екологічність процесу, не впливаючи при цьому на якість покриття і стабільність виробничого процесу.

4. Майбутні дослідження повинні зокрема вивчити довгострокові результати різних циклів регенерації, підходів до попередньої обробки і сушіння сировини з високим рівнем забруднення, а також вплив альтернативних схем дистиляції на ступінь вилучення.

Бібліографічний список

- Zaki, S., Zainal, N., & Tay, C. (2025). Global trends of waste tire pyrolysis research: A bibliometric analysis. *Cleaner Energy Systems*, 10, 100181. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100181>
- Yang, D., Brett, J., & Celina, M. (2025). Hydrolysis of poly(ester urethane): In-depth mechanistic pathways through FTIR 2D-COS spectroscopy. *Polymer Degradation and Stability*, 231, 111094. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.111094>
- Zhang, L., Xue, J., Li, J., Zou, L., Hao, Y., Zhou, X., & Li, W. (2009). Effects of *Galla chinensis* on inhibition of demineralization of regular bovine enamel and enamel with removed organic matrix. *Archives of Oral Biology*, 54(9), 817–822. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2009.06.007>
- Yang, J., Cheng, L., Chen, R., Gu, J., Cai, Y., Huang, Z., & Yuan, H. (2025). Rotary thermal processing for enhanced surface coatings pyrolysis and char removal in waste aluminum can recycling. *Chemical Engineering Journal*, 523, 168453. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.168453>
- Hosseini-fard, F., Setak, M., & Amidpour, M. (2025). Integrating machine learning-based classification and regression models for solvent regeneration prediction in post-combustion carbon capture: An absorption-based case. *Results in Engineering*, 26, 104856. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104856>
- Faizah, J., Noorshamsiana, A., Hasliyanti, A., Hayawin, Z., Nasrin, A., & Parveez, G. (2025). Recovery and enrichment of squalene from palm fatty acid distillate using a pilot-scale multistage separation process. *Food Chemistry Advances*, 9, 101159. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101159>
- Cao, F., Feng, X., Chen, Y., Jiang, H., Han, Y., Chen, T., Shang, Y., Li, D., Zhang, Q., Ma, H., Li, J., & Zhang, G. (2025). Oxygenated aromatic compounds as dominant contributors to the oxidative potential of PM2.5 emitted from biomass burning and coal combustion. *Journal of Hazardous Materials*, 498, 139902. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139902>
- Guerrero-Elias, H., Camacho-Ruiz, A., Espinosa-Salgado, R., Mateos-Díaz, J., Camacho-Ruiz, R., Asaff-Torres, A., & Rodríguez, J. (2025). Spectrophotometric assay for the screening of selective enzymes towards DHA and EPA ethyl esters hydrolysis. *Enzyme and Microbial Technology*, 182, 110531. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2024.110531>
- Karthikeyan, B., Mahalaxmi, S., Rajkumar, G., & Dhivya, V. (2025). Biomineralization and anticariogenic effect of nanocomposite suspensions of eggshell-derived hydroxyapatite and carboxymethyl chitosan on demineralized enamel: A laboratory investigation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 334(2), 149113. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.149113>
- Chen, B., Han, R., Wang, R., Jia, R., Li, H., Xu, Z., & Xu, S. (2025). Thin-film composite (TFC) membrane with cross-linked adamantane (ADA) structure for high-purity organic solvent deep purification. *Separation and Purification Technology*, 379, 134926. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134926>
- Tawonezvi, T., Sinto, A., Zide, D., Nomnqa, M., & Bladergroen, B. (2025). Recovery of organic electrolyte solvents from spent perforated Li-ion cells using a low-temperature vacuum-assisted distillation process. *Chemical Engineering Journal Advances*, 24, 100896. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100896>
- Alises, M., Palomo, E., & González-Viñas, A. (2025). Comparison of spinning cone column versus low-temperature vacuum distillation as wine dealcoholization techniques: Influence on volatile compounds and sensory properties of Tempranillo and Chardonnay wines. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 106, 104253. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104253>
- Perveen, S., Ahmed, M., Hussain, S., Khawar, R., & Hashmi, A. (2025). Caustic regeneration using a versatile glycolated sulfonated poly(ethersulfone)/cellulose acetate membrane via a coupled diffusion dialysis–electrodialysis process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(5), 119149. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119149>

14. Liu, J., Wang, S., Gao, P., Liu, S., Ma, Y., Xu, D., Zhang, L., Gao, J., & Zhang, Z. (2023). Energy-saving investigation of ester hydrolysis to alcohol by reactive extractive distillation: From molecular insight to process integration. *Chemical Engineering Research and Design*, 198, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.08.041>
15. Li, J., Wu, B., Zhong, D., Zeng, K., Chen, X., Gao, J., Liu, T., & Yang, H. (2025). Efficient hydrogen production by biomass pyrolysis in molten salts: Molten salt transformation and green regeneration. *Energy*, 323, 135810. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135810>
16. Meng, H., Zhao, J., Jiang, W., Wang, Y., Xie, Y., Fan, H., Yan, Q., & Xiang, J. (2026). Facile synthesis of a room-temperature liquid dihydrazide from vegetable oils for coatings and polyurethane films. *Progress in Organic Coatings*, 211, 109801. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109801>
17. Yang, J., Cui, M., & Deng, J. (2025). Open-loop recycling of low-quality waste PET to purified terephthalic acid and environmentally friendly solvent via acetolysis: Economic and environmental benefits. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(6), 120233. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.120233>
18. Zhang, H., Chen, H., Wei, Q., Zhang, Z., Fang, M., Yang, J., Qi, F., Tao, H., Wang, R., & He, M. (2025). Study on mechanical vapor compression regeneration performance and process optimization of MEA absorbent solution. *Thermal Science and Engineering Progress*, 66, 104065. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104065>

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-2-40-52

Specialty G1(161). U.D.C.: 667.633.2

PERFORMANCE ASSESSMENT OF REGENERATED METHYL ACETATE IN INDUSTRIAL ENAMEL MANUFACTURING WITH THE ECO PLUS 122 UNIT© V.V. Marchenko¹, S.A. Naboka²*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 61002, Kharkiv, 2 Kirpichova St., Ukraine*¹ Marchenko Viktor V., Postgraduate Student of the Department of Oil, Gas and Solid Fuel Processing Technologies (TPNG and TP), ORCID: 0009-0003-5287-5415, e-mail: 0997727@gmail.com² Naboka Serhii A., Postgraduate Student of the TPNG and TP, ORCID: 0009-0005-3632-997X, e-mail: naseanua@gmail.com

This paper analyzes the technical feasibility of reusing regenerated methyl acetate to produce industrial enamel and evaluates contamination levels and its impact on the regeneration efficiency, the performance of physicochemical restorations and coating-films. The regeneration and reuse of organic solvents is also relevant for coke-chemical enterprises where significant volumes of solvent-containing waste streams are generated during the processing of coal-derived products and coating materials. Solvent was industrially degraded and the five different levels of contamination (MXL0-MXL4) were identified, and distinguished by the differences in the contents and the level of acidity, moisture, density, colour and non-volatile residue. The regeneration was done on the ECO PLUS 122 thermal-distillation unit under controlled working conditions which were adjusted to low boiling point and high pressure of methyl acetate. Feedstock and regenerated solvent (RMXL0-RMXL4) were subjected to measure the extent of purification, and enamel films prepared using regenerated solvent were tested in regards to gloss, hardness and drying behavior. The thermal behavior of the regeneration cycle showed a steady plateau of vapour-temperature at 55-60° C, which proved the selective evaporation of the ester. The form of regeneration yield decreased predictably with a 93 % being the highest and 81 % being the lowest regeneration yield in MXL0 and MXL4 respectively. Nevertheless, the recovered solvent had a great physicochemical recovery: ester content was between 98.4-99.3%, moisture content was below 500 ppm and acid value was not more than 0.11 mg KOH/g. Density, colour and non-volatile residue were close to those of normal industrial grade methyl acetate, implying the retention of hydrolysed and high-boiling impurities in the evaporator. The performance of the enamel-films was also con-

sistent in all of the regenerated samples with the gloss not varying over 1-5 units, HB hardness not deviating over 1-2 and drying time within 39-45 min. These findings verify that regenerated methyl acetate has retained functional qualities necessary to enamel production despite the use of very contaminated feedstock. The results substantiate the technology and environmental-based reason of the use of solvent-regeneration systems like ECO PLUS 122 in the manufacturing coating industry.

Keywords: coke chemical production; methyl acetate; solvent regeneration; physicochemical properties; distillation efficiency; coating film quality.

Corresponding author: V.V. Marchenko, e-mail: 0997727@gmail.com

Manuscript received 2026/02/16

Accepted for publication 2026/03/30

Published 2026/04/17

This article is licensed under a CC BY 4.0 license



Вуглехімічний журнал видається з 1993 р.

ДП «УХІН» зареєстровано суб'єктом у сфері друкованих медіа Рішенням № 1389
Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
(протокол № 27 від 16.11.2023 р.)
Ідентифікатор медіа R30-01930

Друкується згідно з рекомендацією вченої ради ДП «УХІН»,
протокол № 1 від 30.03.2026 р.

Відповідальний за випуск Чешко Ф.Ф.

Набір тексту та макет Званчук-Малік В.Г.

Ціна договірна

Підписано до друку 17.04.2026 р. Формат 60×84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Друк офсетний.

Облік.-видавн. арк. 6,10. Умовн. друк. арк. 6,04. Наклад 150 прим. Зам. № 26-57.

Адреса редакції: ДП «УХІН», вул. Весніна, 7, Харків, 61023, Україна.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців і
розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 6879 від 21.08.2019 р.

Тел., факс: (057) 704-1323,

e-mail: post@ukhin.org.ua

Друк ТОВ «Майдан»,

61002, Харків, вул. Чернишевська, 59, E-mail: maydan.stozhuk@gmail.com

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців і
розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 1002 від 31.07.2002 р.

За зміст статей відповідальність несуть автори



УХІН