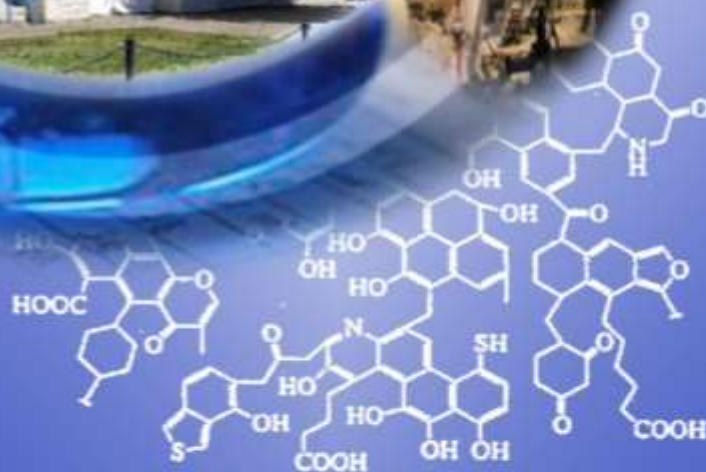




ISSN 1681-309X

ВуглеХімічний журнал



5 2025

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).

Технічні науки (102; 161)

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

Члени редколегії: д.т.н. Л.П. Банніков, (м. Харків), проф., д.т.н. О.Б. Гринишин (м. Львів), ст. досл., к.т.н. О.І. Зеленський (м. Харків), д.ф. В.В. Коваль, відп. секретар (м. Харків), доц., д.х.н. В.Ю. Крамаренко (м. Харків), проф., д.т.н. Д.В. Мірошніченко (м. Харків), проф., д.т.н. А. М'яновскі (м. Глівіце, Польща), 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), доц., к.т.н. І.В. Шульга (м. Харків)

Економічні науки (051)

Члени редколегії: доц., к.е.н., Л.А. Буркова (м. Кривий Ріг), проф., д.е.н., В.Л. Дікань (м. Харків), проф., д.е.н., О.І. Савченко (м. Харків), доц., к.е.н., М.В. Маслак (м.Харків), доц., к.е.н., Ю.М. Попова (м. Київ), проф., д.е.н., І.М. Посохов (м. Харків), д.е.н. В.І. Рудика (м. Харків), проф., к.е.н., В.О. Черепанова (м. Харків), проф., д.е.н., О.О. Чуприна (м. Київ), проф., д.е.н., В.П. Яновська (м. Київ)

ЕКСПЕРТНА ГРУПА

Проф., д.т.н. В.М. Гуляєв, с.н.с., к.т.н. І.Д. Дроздник, 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

5

Науково-виробничий
журнал

Виходить шість номерів
на рік

Заснований у вересні
1993 р

З А С Н О В Н И К И:

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.

<i>Кальмук С.Д., Брик Д.В.</i> Засади екологічної конверсії вугілля	3
<i>Мірошниченко Д.В., Коваль В.В., Бучинська І.В., Борисенко О.Л., Мукіна Н.В., Покрасс Б.Й., Бідоленко Н.Б., Григор'єва В.Д.</i> Обґрунтування залучення вітчизняного вугілля любельського родовища у шихти діючих коксохімічних підприємств України. Повідомлення 1. Дослідження якості вугілля пласта П ₇ ділянки «Любельська» № 3 та вугільних концентратів	12
<i>Мірошниченко Д.В., Банніков Л.П., Дорошенко К.О., Савченко В.В.</i> Особливості формування хімічних продуктів в процесі коксування трамбованих шихт	26
<i>Борисенко О.Л., Шульга І.В., Телешев Ю.В., Котляров Є.І.</i> Властивості коксу з вугільних шихт з різними супутніми продуктами переробки вугілля	32
<i>Борисенко О.Л., Касимов О.М.</i> Екологічна оцінка технології мокро-вапнякової десульфуризації димових газів коксових печей	41
<i>Мірошниченко Д.В., Жаров С.Л., Квасов О.В., Кузін Д.К., Марченко В.В., Набока С.А.</i> Використання регенованих розчинників у виробництві промислових емалей та ґрунтів	48
Запрошуємо до співробітництва	64

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-5-1-64

© ДП «УХІН», «Вуглехімічний журнал», 2025
ISSN 1681-309X



Journal of Coal Chemistry

5

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.

<i>Kalmuk S.D., Bryk D.V.</i> Principles of ecological coal conversion	3
<i>Miroshnychenko D.V., Koval V.V., Buchynska I.V., Borysenko O.L., Mukina N.V., Pokrass B.Yo., Bidolenko N.B., Grigor'eva V.D.</i> Justification of the inclusion of domestic coal of the lubelskie field in the boilers of operating coke-chemical enterprises of Ukraine Report 1. Research of the quality of coal of the P7 seam of the "Lubelskie" site NO. 3 and coal concentrates	12
<i>Miroshnychenko D.V., Bannikov L.P., Doroshenko K.O., Savchenko V.V.</i> Features of chemical product formation during the coking of stamp-charged coal blends	26
<i>Borysenko O.L., Shulga I.V., Teleshev Yu.V., Kotlyarov Ye.I.</i> Properties of coke from coal blends with various co-products	32
<i>Borysenko O.L., Kasimov O.M.</i> Ecological assessment of the wet limestone desulphurisation technology for coke oven flue gases	41
<i>Miroshnychenko D.V., Zharov S.L., Kvasov O.V., Kuzin D.K., Marchenko V.V., Naboka S.A.</i> Use of regenerated solvents in the production of industrial enamels and primers	48
Invitation to cooperation	64

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-5-1-64

ЗАСАДИ ЕКОЛОГІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ ВУГІЛЛЯ© С.Д. Кальмук¹, Д.В. Брик²*Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3а, Україна*¹ Кальмук Соломія Дмитрівна, провідний інженер лабораторії проблем геоecології при відділі геології і геохімії твердих горючих копалин (ВГТТГК), e-mail: solomiya.kalmuk@gmail.com² Брик Дмитро Васильович, докт. техн. наук, с.н.с., зав. ВГТТГК, e-mail: dmytrobryk@ukr.net

У роботі розглянуто структуру світового енергетичного ринку. Зазначено, що споживання первинної енергії у світі збільшилося майже на 14 %. Станом на 2021 р. найбільшими споживачами первинної енергії були Азіатсько-Тихоокеанський регіон, Північна Америка та Європа. Вказано, що основу в структурі світового енергетичного ринку посідає викопне паливо (вугілля, нафта, газ). Підкреслено, що вугілля було і залишається на сьогодні основою промислової революції у світі, незважаючи на швидке зростання альтернативної енергетики. За прогнозами показано тенденцію незначного зросту світового видобутку вугілля і зменшення видобутку нафти та газу до 2050 р.

Приділено увагу питанню щодо видобутку та споживання енергії в Україні, яке пов'язане з необхідністю імплементації цілей сталого розвитку держави в екологічно та економічно прийнятний спосіб. Наведено структуру запасів викопного палива в Україні і зазначено, що вугільні ресурси значно переважають усі інші види викопного палива (нафта, газ). Проаналізовано, що при прогнозних запасах вугілля близько 117 млрд. т. позабалансові (некондиційні) запаси становлять майже 59 млрд. т. Тому в статті пропонується розробляти ці некондиційні пласти вугілля методом підземної газифікації. Такий спосіб екологічної конверсії дозволить залучити до енергетичного обігу країни значні обсяги некондиційних паливно-енергетичних ресурсів. Це мінімізує шкоду довкіллю і сприятиме сталому економічному розвитку.

Розглянуто принцип газифікації твердих палив і встановлено, що найкращими виробничими показниками є процеси підземної газифікації вугілля (ПГВ) на водокисневому та водяному (водяна пара) реагентах. Більш перспективним для ПГВ є використання дешевих рідких реагентів, наприклад, води (пари). Зазначено переваги, недоліки та удосконалення технології процесу ПГВ. Акцентовано увагу на можливості подальшого використання цільового газу, котрий, в основному, складається з CO та H₂, для виробництва синтетичного рідкого палива (СРП) за методом Фішера-Тропша.

Ключові слова: світова енергетика, енергетика України, вугілля, некондиційні тверді горючі копалини, газифікація вугілля, підземна газифікація, цільовий газ.

Автор для листування С.Д. Кальмук, e-mail: solomiya.kalmuk@gmail.com

Актуальність роботи. В останні десятиліття глобальні зміни навколишнього природного середовища стали стримуючим фактором розвитку суспільства, що потребує поглибленого аналізу та розроблення наукових підходів щодо зменшення негативного техногенного впливу на екологію у світі та в Україні. Концепція сталого розвитку передбачає гармонізацію соціальних, економічних та екологічних складових трансформації суспільства. В Україні екологічні ризики переважно спричинені промисловим сектором, зокрема паливно-енергетичним комплексом – сукупністю підприємств, які забезпечують соціальну сферу та економіку енергетичними ресурсами, однак вони ж і є джерелом підвищеної екологічної небезпеки.

Зростаючі потреби енергозабезпечення розвитку світової економіки спричинили тенденцію до економії енергетичних ресурсів і пошуку способів та технологій підвищення ефективності використання первинних енергоносіїв.

Світовий ринок енергоресурсів. Структура світового енергетичного ринку з кожним роком стає диверсифікованою. Загальний обсяг споживання первинної енергії у світі збільшується.

У статті [1] проаналізовано споживання первинної енергії у світі впродовж 2011-2021 рр. Зазначено, що споживання первинної енергії в усьому світі зросло на 14,25 %. Найбільшими споживачами первинної енергії у 2021 р. були Азіатсько-Тихоокеанський регіон, Північна Америка і Європа, що становило 45,78 %, 19,10 % та 13,84 % відповідно від загально обсягу. Також слід відзначити, що до 2019 р. спостерігалось поступове збільшення спожи-

вання первинної енергії у світі, але у 2020 р. у зв'язку з пандемією COVID-19 це споживання дещо скоротилося майже на 4 %. Вже в 2021 році пандемія COVID-19 поступово стає контрольованою і споживання первинної енергії повертається до докризового рівня. Також авторка вказує, що впродовж досліджуваного нею періоду зросло виробництво паливно-енергетичних ресурсів. Найбільших змін зазнало виробництво відновлювальної енергії, яке за 10 років збільшилося більше ніж в чотири рази. Це свідчить про перехід на альтернативні методи використання енергії природних джерел. Виробництво вугілля збільшилося лише на 3,54 %. Найменших змін у виробництві зазнала атомна енергія. Авторка статті пояснює це високою собівартістю виробленої енергії. Перевагою атомної енергії є відсутність викидів аерозолів та парникових газів в атмосферу. У 2020 р. у зв'язку із пандемією COVID-19 зменшилося виробництво майже по всіх видах паливно-енергетичних ресурсів, окрім гідроелектроенергетики і відновлювальної енергії.

У подальшому авторка зазначає [2], що основу в структурі світового енергетичного ринку посідає традиційна енергетика. Найбільш популярними ресурсами в сучасних реаліях є газ, нафта і вугілля. Лідером у світі з видобутку нафти є США. Так, у червні 2022 року середньодобовий видобуток сирої нафти у США досягнув 12,1 млн барелів на добу. Наступним важливим напрямом світового енергетичного ринку є ринок газу. На природний газ припадає близько чверті світового виробництва електроенергії. Станом на 2020 р. найбільша регіональна частка видобутку природного газу припадала на Близький Схід (38,4 %). Важливим природним енергетичним ресурсом у світі є вугілля. Саме вугілля людство вперше почало використовувати як паливо. Використання вугілля стало основою промислової революції і тим самим дало поштовх до стрімкого розвитку енергетики. Беззаперечним лідером у світі за видобутком вугілля є Китай. Саме в Китаї видобуток вугілля становить майже чотири млрд т. До видобувачів великих обсягів вугілля авторка статті відносить такі країни світу як США, Австралія, Індія. Регіональна частка видобутку вугілля у світі у 2020 р. складала: Китай – 49,7 %, Азія (без ОЕСР) – 19,6 %, організація економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) – 18,8 %.

Спеціалісти Міжнародної енергетичної агенції (МЕА) у своєму звіті “Електроенергія 2025. Аналіз та прогноз до 2027 року” наводять дані, що до 2027 року споживання електроенергії зростатиме в середньому на 4 % щорічно. Зазначено, що у 2024 р. світовий попит на електроенергію зростає на 4,3 % і, за прогнозами, такий темп зростання зберігатиметься до 2027 р. Цей підвищений попит зможуть задовольнити відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) та ядерна енергетика. Очікується,

що світове споживання електроенергії зростатиме найшвидшими темпами з 2025 по 2027 рік [3].

У дослідженні [4] наводяться наступні тенденції щодо світової енергетики.

Викопне паливо. Частка викопних видів палива у світовому енергетичному балансі знизилася з 82 % у 2013 році до 80 % у 2023 році. Про швидкість скорочення частки викопних видів палива в енергоспоживанні свідчить той факт, що у 2000 році їхня частка становила 81,2 %. У найоптимістичнішому «зеленому» сценарії на XXI століття на них припадатиме близько 67 % світового енергетичного балансу. Попит на енергію збільшився на 15 % за останні 20 років, але 40 % цього зростання було досягнуто завдяки чистій енергії, тобто поновлюваним джерелам енергії, ядерній енергії та паливним матеріалам із низьким рівнем викидів, включно з уловлюванням, використанням і зберіганням вуглецю. У розвинених країнах попит на енергію скорочувався в середньому на 0,5 % на рік. Попит на нафту досяг пікового значення 2005 року, вугілля – 2008 року. Попит на газ теж припинив зростати. Частка ядерної енергії скорочувалася на половину відсоткового пункту на рік. У 2023 році викопне паливо забезпечило 60 % світового виробництва електроенергії – це найнижча частка від загального обсягу за останні 50 років. На вугілля припадає найбільша частка в загальному обсязі – 36 %, при цьому значну роль також відіграє природний газ – 22 %. Частка ядерної енергетики знизилася на 9 %, що вдвічі менше, ніж 30 років тому. Попри зниження вироблення гідроелектроенергії, відновлювані джерела енергії вперше досягли 30 % світового виробництва електроенергії, а вітрова та сонячна фотоелектрична енергія разом забезпечують 13 %, що вдвічі перевищує рівень того, що було п'ять років тому. За оцінкою МЕА, відновлювані джерела енергії відіграватимуть набагато більшу роль в енергосистемах у наступні десятиліття. У сценарії STEPS (Stated Policies Scenario) комбінована сонячна та вітрова генерація майже потроїться з 2023 по 2030 рік, що становитиме понад 90 % зростання постачання електроенергії та обжени вугілля. Пік його споживання очікується приблизно на 2025 рік, а потім починається стійкий спад. До 2035 року сонячні фотоелектричні та вітрові електростанції забезпечуватимуть понад 40 % вироблення електроенергії.

Прогноз та споживання деяких видів енергії по 2050 р. наведено у роботі [5], де показано тенденцію зросту світового видобутку вугілля до 2050 р., нафти – зріст до 2010 р., а потім спад, газу – зріст до 2025 р., потім теж спад.

Варто зауважити, що, навіть при нарощуванні виробництва енергії шляхом залучення джерел “зеленої” енергетики, світ загалом та Україна зокрема не можуть цілком відмовитися від вугілля – як сировини для виробництва енергії у найближчих десятиліттях, так і сиро-

вини для хімічної промисловості – у подальшому через 40-50 років при значному зменшенні або вичерпанні запасів нафти і газу [6]. Тому у США, ПАР, Австралії, Канаді, Китаї, Європі активно проводяться роботи з газифікації вугілля. Так, у Китаї, Австралії, ПАР працюють промислові установки як з наземної, так і з підземної газифікації вугілля (ПГВ). Лише у Китаї та Австралії їх більше десяти, а з демонстраційними проектами станцій “Підземгаз” – більше двадцяти. Окрім того, Китай буде п’ять заводів з наземної газифікації вугілля вартістю 30 млрд. доларів США [5-10].

Зазначимо, що Китай у 2022 р. видобував понад 3,9 млрд. т. вугілля в рік. А в 2024 р. у Китаї виробництво енергії з альтернативних джерел стрімко зросло і вже незначно перевищило виробництво енергії з вугілля.

Видобуток і споживання енергії в Україні. У зв’язку з необхідністю імплементації цілей сталого розвитку України виникає потреба поглибленого дослідження однієї з основних сфер забезпечення сталого розвитку в цілому, а саме енергетичної сфери. Слід зазначити, що енергетика, будучи основою для досягнення цілей сталого розвитку, потребує скоординованих послідовних заходів. Неспроможність сфери енергетики забезпечити потреби суспільства та економіки в екологічно та економічно прийнятний спосіб ставить під загрозу можливість досягнення цілей сталого розвитку.

Україна належить до енергодефіцитних держав, оскільки власне виробництво первинних енергоресурсів покриває валове споживання лише на 53 %. При середньому видобутку енергетичних копалин на рік (нафти – 2 млн. т, газу – 21 млрд. м³, вугілля – 28,9 млн. т) імпорту нафти, нафтопродуктів і частково газу становить близько 80 % від потреб. Структура запасів викопного палива в Україні виглядає таким чином: вугілля складає 94-97 %, нафта і газ – 6-3 %, тобто вугільні ресурси значно переважають за запасами усі інші. [11-14].

Енергетичною стратегією України на період до 2050 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”, яка затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р [15], окреслено стратегічні орієнтири розвитку паливно-енергетичного комплексу України на період до 2050 року, серед яких одними з пріоритетних завдань визначено розширення мінерально-сировинної бази з метою нарощування виробництва енергії з відновлювальних джерел та підвищення енергоефективності господарського комплексу країни.

Відмова від твердих видів палива і перехід на відновлювальні джерела енергії є загальноєвропейською тенденцією, спрямованою на збереження екологічно чистого майбутнього, та частиною зобов’язань для боротьби зі зміною клімату, які ЄС взяв на себе в рамках “Європейської зеленої угоди” та “Парижкої угоди” 2015 року. Концепція “зеленого” енергетичного пере-

ходу України до 2050 року передбачає поступове заміщення вугільної генерації та перехід економіки України, яка сьогодні базується на використанні викопних видів палива, до кліматично нейтральної економіки. Але Україна не зможе швидко відмовитися від виробництва електроенергії на теплових електростанціях; і не лише через те, що тепла генерація виконує роль маневрових потужностей для енергосистеми та є економічно конкурентною, але й тому, що декарбонізація та перехід енергетики на відновлювальні джерела енергії коштують дорого, тому їх можуть собі дозволити лише багаті індустріально розвинені країни. У цих умовах основними напрямками розвитку енергетики в Україні будуть підвищення енергоефективності, енергозбереження та екологічні технології використання паливно-енергетичних ресурсів з поступовими декарбонізацією та переходом до зеленої енергетики [16].

Незважаючи на впровадження в Україні альтернативних і відновлюваних джерел енергії, пріоритетним напрямом соціально-економічного розвитку до 2035 року залишається збільшення видобутку вуглеводнів загалом і вугілля зокрема [17].

Україна видобувала певні обсяги вугілля, нафти та природного газу. Однак внутрішнього виробництва було недостатньо для покриття попиту. У 2021 році виробництво енергії в Україні становило 55 млн тон н. е. (55 Mtoe) або майже дві третини (62 %) загального обсягу пропозиції. Хоча відновлювані джерела енергії роблять скромний внесок в енергетичний баланс країни, виробництво сонячної та вітрової енергії швидко розширювалося. Теплові електростанції України виробляють електроенергію з вугілля, нафти та газу. Деякі електростанції спроектовані так, щоб вони могли працювати як на вугіллі, так і на природному газі, причому вугілля є основним паливом. Електростанції, що працюють лише на природному газі (потужністю 4,6 ГВт), протягом останнього десятиліття використовуються зрідка [4].

Прогнозовані запаси вугілля в Україні складають близько 117 млрд. т, розвідані – 57 млрд. т, що при довоєнному середньорічному видобутку 28,9 млн. т (2020 р.) може забезпечити потреби економіки протягом сотень років, причому некондиційні (позабалансові) запаси вугілля складають більше 40 млрд. т. [11-14].

Ресурси нафти та газу в Україні незначні в порівнянні з потребами. В той час як запаси вугілля, як наведено вище, складають 117 млрд. т. Енергетична проблема в нашій країні повинна вирішуватися як шляхом зниження долі нафти та газу як палива і заміни їх вугіллями, так і прискореним впровадженням альтернативних та відновлювальних джерел енергії. Тільки у Львівсько-Волинському басейні з розвіданих запасів кам’яного вугілля шахтним способом можна видобути приблизно 70 % (1450 млн. т), а залишок – більше 30 % (650 млн. т), це вугілля, котре знаходиться

в некондиційних вугільних пластах і яке недоцільно видобувати шахтним методом. В зв'язку з цим актуальною постає проблема розробки некондиційних (малопотужних, глибокозалягаючих та ін.) вугільних пластів способом підземної газифікації вугілля (ПГВ) [18, 19].

Оцінка запасів некондиційних паливно-енергетичних ресурсів в Україні. У загальному випадку до некондиційних горючих копалин можна віднести частину балансових та позабалансових запасів первинних видів енергетичної сировини та значні обсяги вуглецевмісних техногенних відходів

вуглевидобутку, вуглезбагачення, нафтопереробки тощо, які на сьогодні за фізико-хімічними, енергетичними чи геолого-просторовими умовами не відповідають економічним критеріям видобування та використання традиційними способами.

З порівняння даних про запаси і видобуток горючих копалин в Україні (табл. 1) [11] видно, що загалом запаси багатократно перевищують річний видобуток. Тому на сьогодні основним енергетичним ресурсом в Україні є вугілля з балансовими запасами близько 57 млрд. т.

Таблиця 1

Запаси і видобуток горючих копалин в Україні

Корисна копалина (енергетична сировина)	Одиниця виміру	Балансові запаси	Видобуток
		Кількість	Кількість
Природний газ	млн. м ³	804 369	20 949
Газовий конденсат	тис. т	39 795	679
Нафта	тис. т	99 986	1 622
Вугілля буре	тис. т	2 892 551	10
Вугілля кам'яне	тис. т	52 636 158	20 019

В Україні енергетична сировина розподілена за територіями дуже нерівномірно. Аналогічно нерівномірно розміщені і вуглецевмісні відходи вуглевидобутку та вуглезбагачення. Що стосується некондиційної енергетичної сировини, то її відсоток, в залежності від виду палива, коливається від 50 % до 80 %. Такі значні відсотки некондиційного первинного палива зумовлені тим, що в попередні десятиліття виробники першочергово видобували паливо з найкращими характеристиками за найсприятливіших умов розробки покладів і родовищ, оминаючи паливо з гіршими показниками і складнішими геологічними умовами та нехтуючи екологією. Способи екологічної конверсії дозволяють залучити до енергетичного обігу країни значні обсяги некондиційних паливно-енергетичних ресурсів.

Фізико-хімічні основи процесу газифікації твердих палив. Принцип газифікації твердих видів палива, наприклад "водяний газ" (CO+H₂), полягає в тому, що вуглець палива шляхом неповного окиснення водяною парою переводиться в газоподібний оксид вуглецю і водень. При цьому водяна пара відновлюється до водню. В процесі термічної газифікації вугілля водяною парою утворюються (з урахуванням газу піролізу) наступні гази: CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, C₂H₆ та ін. Газ ПГВ може використовуватися для потреб енергетики, оскільки він за своїми теплотехнічними властивостями є придатним для спалювання в пічках котлів, турбін тощо. і має всі переваги газоподібного палива [20].

Визначено основні залежності протікання процесів гетерогенного горіння. Значно менше досліджені кінетичні характеристики та тепловий режим процесу газифікації. В лабораторних умовах процес газифікації вугілля досліджений досить добре в широких межах температур, але ці дані отримані лише для стандартного тиску. В підземних умовах, де тиски можуть досягати десятків, як не сотень атмосфер, на основі цих даних неможливо обчислити швидкість газифікації вуглецю та інші теплофізичні параметри процесу.

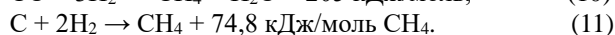
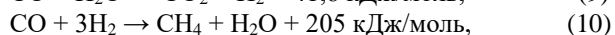
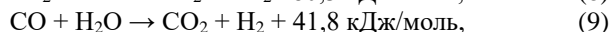
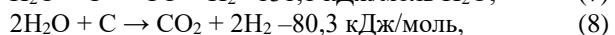
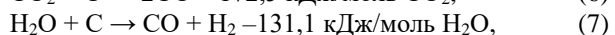
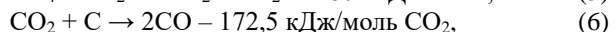
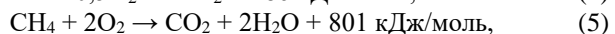
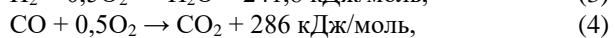
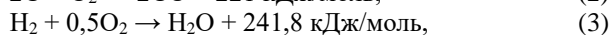
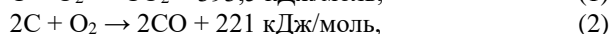
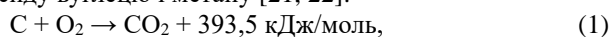
Основною метою при ПГВ є отримання газу з максимально можливою теплою згорання при мінімальних фінансових і соціальних витратах, а також при мініальному забрудненні навколишнього середовища.

ПГВ порівняно зі звичайним шахтним видобутком вугілля має ряд переваг: виключається небезпека роботи людей під землею та покращуються їх умови праці; зменшується забрудненість довкілля; не використовується під складування відходів вугільної промисловості родючий шар ґрунту; виключається ціла низка технологічних операцій; покращується стан біосфери; існує можливість використання вугільних некондиційних покладів (малопотужних, багатозольних, обводнених, глибокозалягаючих, солоних, високосірчистих та ін.), розробка котрих шахтним способом є нерентабельною, а інколи і неможливою.

До можливих недоліків ПГВ відносяться: осідання ґрунту; витік газу при неглибокому (150-200 м) заляганні вугільних пластів; можливість забруднення

підземних вод продуктами газифікації; відносно високої втрати вугілля в надрах; невисока теплота згоряння газу, котрий отримують на повітряному дутті – 3,3 МДж/м³ з бурого вугілля та 4,2 МДж/м³ з кам'яного вугілля, і, як результат, невелика відстань (25-30 км) економічно доцільного транспортування газу вказаної вище теплотворності до споживачів.

В основі процесу ПГВ лежать ті самі хімічні реакції, що і у звичайному наземному газогенераторі: горіння вуглецю, відновлення діоксиду вуглецю, розклад водяної пари, конверсія оксиду вуглецю, горіння водню, оксиду вуглецю і метану [21, 22]:



Процес газифікації вугілля складається з двох стадій. Перша стадія – термічний розклад (піроліз або суха перегонка) органічної маси вугілля з утворенням летких речовин (парогазові продукти) та твердого залишку (коксу), горючу частину якого складає вуглець. Друга стадія – власне газифікація, перетворення вуглецю коксового залишку в горючі гази (CO, H₂ і CH₄) в результаті взаємодії з O₂, H₂O, CO₂ і H₂.

На відміну від наземної, при підземній газифікації є ряд особливостей:

- відсутнє переміщення палива і вигорання вугілля відбувається за рахунок переміщення зони горіння та інших зон газифікації (зона відновних реакцій, зона піролізу і зона підсушки вугілля);

- внаслідок газопроникності стінок в процесі газоутворення приймає участь не тільки волога вугілля, але і волога вміщуючих порід;

- вздовж реакційного каналу, котрий межує безпосередньо з вугільною масою, відбувається термопідготовка вугільного пласта;

- відстань між свердловинами у вугільному пласті в багато разів перевищує необхідну довжину зони реагування.

В залежності від дуттєвих реагентів при підземній газифікації вугілля можуть утворюватися наступні гази:

1. Піролізний газ. Піроліз є першою і багато в чому визначальною стадією при будь-якому способі газифікації [23]. В процесі ПГВ піроліз або суха перегонка вугілля відбувається в нагрітих зонах поблизу основного високотемпературного вогнища хімічних реакцій. Тим не менш, піролізний газ (теплота згоряння в середньому 24-26 МДж/м³) вносить суттєвий

додаток в загальну теплотворність газу підземної газифікації вугілля.

2. Повітряний вугільний газ. Утворюється при продуванні повітря через шар розпеченого вугілля. При вході у розпечене вугілля відбувається звичайна екзотермічна реакція горіння (1), а потім в нагрітій зоні вугілля діоксид вуглецю відновлюється до оксиду вуглецю по ендотермічній реакції за схемою (6). Сумарний тепловий ефект реакцій (1) і (6) є додатним, тому вугілля весь час підтримується в нагрітому стані за рахунок переважаючого тепловиділення реакції (1). Граничний тепловий коефіцієнт корисної дії (ТККД) цього процесу – 77,5 %, на практиці досягаються значення ТККД до 70 %. У зв'язку з високим вмістом в газі негорючого баласту – азоту теплота згоряння такого газу не перевищує 4,4 МДж/м³.

3. “Водяний” вугільний газ утворюється при продуванні крізь розпечене вугілля водяної пари за ендотермічною реакцією (7). Процес вимагає постійного підведення тепла в кількості 241,8-110,5=131,3 кДж/моль H₂O або 65,7 кДж/моль синтезованого газу. Теплота згоряння водяного газу досить висока, близько 11,8 МДж/м³. Добрі результати отримують при температурах вище 900-1000 °С. Підвищення тиску сприяє утворенню метану та діоксиду вуглецю по схемі:



Подібний процес газифікації вже вимагає підведення тепла в газогенератор у кількості (2 × 241,8 – 393,5 – 74,8) : 2 = 7,65 кДж/моль H₂O. Для практики найбільшу цінність має водяний газ без домішок азоту. І якщо в наземних газогенераторах було налагоджено його виробництво, то в підземних умовах ні, оскільки виникає складність у покритті ендотермічності реакції (7).

4. Вуглекислий вугільний газ утворюється при продуванні діоксиду вуглецю через розпечене вугілля по схемі (6). Незважаючи на високу теплоту згоряння синтезованого газу – 11,8 МДж/м³ цей процес не витримує комерційної конкуренції з процесом за схемою (12) при ПГВ, а нагнітання газоподібного CO₂ в свердловину під тиском є значно більш енергоємним процесом, ніж нагнітання рідкої води в пласт.

5. Кисневий вугільний газ отримують так само як повітряний газ – продуванням кисню через шар розпеченого вугілля по тій самій схемі (2) і (6). Але кінцевий газ не містить негорючого баласту азоту і тому його теплотворність висока – більше 11,7 МДж/м³. Процес відрізняється високим екзотермічним тепловиділенням – до 221 кДж/моль O₂. При ПГВ на кисневому дутті високе тепловиділення реакції сприяє неконтрольованому зростанню температури в зоні синтезу та може призвести до плавлення гірських порід. Тому, а також внаслідок високої ціни, кисень, як реагент, в чистому вигляді не може бути використаний

для ПГВ, але у сполученні з ендотермічними реакціями комбінована ПГВ є перспективною.

6. Водневий вугільний газ утворюється при нагнітанні через шар нагрітого вугілля водню під тиском за схемою (11). При достатній термоізоляції газогенератора реакція (11) може самопідтримуватися без додаткових джерел тепла. Теплотворність газу висока – до 34 МДж/м³. Підвищення тиску сприяє утворенню більш високомолекулярних вуглеводнів, що ще вище підносить теплотворність газу. За своїми показниками реакція (11) є найбільш досконалим процесом для ПГВ. Але сам реагент – водень – є дефіцитним газовим паливом.

7. Водокисневий вугільний газ отримують при нагнітанні через розпечене вугілля суміші води та кисню в будь-якому стехіометричному співвідношенні. Підбором складу суміші реагентів можна регулювати тепловий ефект реакцій у широких межах – від ендотермічного до сильно екзотермічного.

З викладеного вище витікає, що для ПГВ доцільно використовувати тільки три недефіцитні реагенти – повітря, воду і кисень. Газ, що отримують на повітряному дутті (з низькою теплою згоряння і засмічений азотом до 70 %), є мало придатним для

широкого споживання. Кисень реагує з вугіллям надто інтенсивно, що призводить до плавлення гірських порід. Використання кисневого дуття забезпечує: значне зменшення об'єму реагенту, що закачують в свердловину; підвищення питомого виходу горючого газу; збільшення теплоти згоряння газу [24]. В той самий час існують і недоліки: потреба в додаткових витратах на будівництво кисневого заводу; вибухонебезпечність; кисень, котрий не прореагував, може окиснювати частину синтезованого газу [25-28].

Більш перспективним для ПГВ є використання дешевих рідких реагентів, наприклад, води, що дозволить отримувати газ, не засмічений азотом, і підвищити його якість. Вода є доступним і недорогим реагентом, котрий не вимагає – що дуже важливо для сьогоденного стану економіки України – доозброєння станції ПГВ складним і дорогим обладнанням. Крім того, вода, котра не прореагувала, може бути повторно використана для закачування у вугільний пласт.

Кращими виробничими показниками відзначаються процеси ПГВ на водяному та водокисневому реагентах (табл. 2), стехіометрія котрих буде залежати від умов залягання вугілля [24], що більш детально для водного реагенту буде обґрунтовано в подальшому.

Таблиця 2

Характеристика процесів газифікації вуглецю різноманітними реагентами (Т – 1200 °С, Р – 0,1 МПа)

№ п/п	Реагент	Теплота реакції синтезу, кДж/моль O ₂	Граничний вихід газу, м ³ /м ³ реагенту		Об'ємний граничний склад газу						Гранична теплотворна здатність газу, кДж/м ³	
			Загальний	В т.ч. горючих	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	CH ₄	N ₂		
1	Повітря	44,2	1,2	0,4	0,33	–	–	–	–	–	0,66	4060
2	Повітря + H ₂ O	8,0	1,6	0,8	0,40	0,15	0,15	xx	xx	0,40	5860	
3	Повітря + CO ₂	8,0	1,6	0,5	0,50	–	0,10	–	–	0,40	5940	
4	Кисень	221,0	2,0	2,0	0,98	–	0,02	–	–	–	11700	
5	Кисень + CO ₂	42,0	4,0	4,0	0,98	–	0,02	–	–	–	11810	
6	O ₂ + H ₂ O	42,0	4,0	4,0	0,75	0,24	0,01	xx	xx	–	11500	
7	½ O ₂ + H ₂ O	-67,0	3,0	3,0	0,66	0,34	x	xx	xx	–	11300	

x – з підвищенням тиску в складі газу з'являється CH₄ і CO₂

xx – зі зниженням температури зростає CO₂ і H₂O

Основним недоліком газу ПГВ є його засміченість негорючим баластом – діоксидом вуглецю та азотом. Тільки при газифікації вугілля водяною парою цей недолік усувається, а отриманий “водяний” вугільний газ складається головним чином з CO і H₂. Це значно знижує питомі витрати на його транспортування, а також надає можливість використовувати його як хімічну сировину, наприклад у виробництві рідкого палива за методом Фішера-Тропша. Однак, внаслідок ендотермічності процесу, необхідним є або отримання змішаного газу шляхом вдування суміші кисню та води, або реалізація циклічного процесу, який охоплює дві

стадії: неробочу – розігрів пласта вдуванням окиснювача і робочу – вдування води. При цьому утворюється цільовий газ, але вугільний пласт поступово охолоджується. Обидві стадії утворюють один робочий цикл.

Удосконалити технологію ПГВ можна також шляхом проведення процесу газифікації при високих тисках у вугільному пласті. Високі тиски при ПГВ відіграють позитивну роль з наступних причин:

– отримання газу під високим тиском виключає витрати на його подальшу компресію і дозволяє

здійснювати безкомпресорну передачу: наприклад, при тиску 1,8 МПа на віддаль 200-250 км;

– високі значення тиску сприяють протіканню реакцій утворення метану;

– збільшується турбулентність і вироблення газу високої теплоти згоряння [29];

– спостерігаються нижчі швидкості газу при заданій витраті дуття, у відповідності з чим зменшуються і втрати тиску в трубопроводах;

– підвищення тиску прискорює хімічні реакції.

Таким чином, отримати газ теплотворності 9-13 МДж/м³ можна шляхом застосування води (водяної пари) під високим тиском. Тому ми вважаємо воду найбільш перспективним реагентом для цілей ПГВ у порівнянні з газоподібними окиснювачами. При цьому затрати енергії на її нагнітання в пласт у багато разів менші, ніж на нагнітання кисню, а тим паче повітря [27].

Проведений аналіз процесу газифікації вугілля дає можливість критично оцінити досвід роботи колишніх станцій “Підземгаз” в Україні, виявити причини їх нерентабельності за традиційною технологією ПГВ та накреслити шляхи їх усунення, а саме:

• Висока енергоємність технологічного процесу при нагнітанні у вугільний пласт повітря внаслідок високого вмісту в повітрі баласту – азоту. У випадку переходу на нагнітання рідкого реагенту – води та/або кисню – енергозатрати на компресію реагенту значно знижуються.

• Низька теплота згоряння синтезованого горючого газу на повітряному дутті (3300-3800 кДж/м³) в зв'язку з високим вмістом в його складі негорючого баласту – азоту (до 65 %). Шляхом вилучення азоту зі складу горючого газу можна збільшити його теплоту згоряння у три рази – до 8400-11000 кДж/м³.

• Низький питомий і валовий вихід горючого газу – до 1,2 м³ на 1 м³ повітря, що нагнітається. Цей показник суттєво зростає при нагнітанні у вугільний пласт води, кисню або їх суміші (до 4 м³ на 1 м³ кисню).

• Відсутність способів управління та контролю режиму підземного процесу синтезу горючого газу з вугілля внаслідок незмінного складу реагенту – повітря. Можливості управління температурою підземного реактора існують при нагнітанні в пласт води або водокисневої суміші; кількість води регулюється в залежності від складу синтезованого газу, що виходить на поверхню.

• Відсутність можливості контролю гартування (різке охолодження) продуктів реакції, в результаті чого при повільному переході з гарячої зони синтезу в холодну зону вугільного пласта висококалорійний газ, що утворився, значно втрачає теплоту згоряння внаслідок неминучих хімічних реакцій (рекомбінація СО та Н₂ у СО₂ та Н₂О, реакція Будуара та ін.). Цей недолік ПГВ можна усунути шляхом наближення

високотемпературної зони реакції до забою експлуатаційної свердловини з метою контролю гартування гарячого синтезованого газу зустрічним потоком води безпосередньо на забої.

• Висока собівартість газу, отриманого на повітряному дутті.

• У подальшому є можливість використання такого газу, котрий складається в основному із СО та Н₂, для виробництва синтетичного рідкого палива (СРП) за методом Фішера-Тропша.

З викладеного вище випливає, що це дозволить підвищити теплотворність газу і його питомий вихід, знизить енергоємність процесу і, в кінцевому підсумку, дозволить знизити собівартість газу до рівня конкурентоздатності за ціною з природним газом та з традиційними способами видобутку вугілля.

Висновки

З викладеного вище стає очевидним, що при світовій тенденції до зменшення споживання вугілля у найближчій перспективі і у подальшому, вугілля є серед основних джерел енергії, а у майбутньому (через 40-50 років) буде основною сировиною для хімічної промисловості.

Для випадку термохімічної переробки вугілля методом підземної газифікації некондиційних пластів цікавим є застосування води (водяної пари) у якості дешевого рідкого реагенту.

На наш погляд, в Україні варто продовжити дослідження з розробки і впровадження у практику процесу підземної газифікації з активним залученням позабалансових пластів вугілля.

Бібліографічний список

1. **Козут-Ференс О.І.** Світовий ринок енергетики: сучасний стан / **О.І. Козут-Ференс** // Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка. – 2022. – Вип. 13. – С. 30-36. <https://doi.org/10.32782/2708-0366/2022.13.3>.

2. **Козут-Ференс О.І.** Модель сучасного світового енергетичного ринку / **О.І. Козут-Ференс** // Економічний вісник Дніпровської політехніки. – 2022. – № 2 (78). – С. 36-42. <https://doi.org/10.33271/ebdut/78.036>.

3. **Велика Г.** ВДЕ та ядерна енергетика зможуть покрити приріст світового попиту на електроенергію – МЕА / **Г. Велика** // Екополітика / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/vde-ta-yaderna-energetika-zmozhut-pokriti-pririst-svitovogo-popitu-na-elektroenergiju-mea/>.

4. **Романчук Я.** Енергетика: світові тенденції 2025. Дослідження світового ринку виробництва енергії. Глобальний контекст для створення енергетичної стратегії України / **Я. Романчук** // International Liberty

Institute / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.libertyinstitute.org/articles/energetika-svitovitendencziyi-2025>.

5. Брик Д.В. Синтетичне паливо з вугілля – перспективний замітник нафти і природного газу / Д.В. Брик, М.І. Павлюк, Р.Г. Макітра // Вуглехімічний журнал. – 2006. – № 3-4. – С. 3-9.

6. Брик Д.В. Вугілля як сировина енергетики століття / Д.В. Брик, Р.Г. Макітра, М.І. Павлюк // Вуглехімічний журнал. – 2006. – № 1-2. – С. 44-47.

7. Грин М. Возрождение подземной газификации угля / М. Грин // Вуглехімічний журнал. – 2007. – № 1-2. – С. 43-49.

8. Брик Д.В. Геотехнологія отримання синтез-газу ($\text{CO} + \text{H}_2$) та енергетичного газу ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) способом підземної газифікації / Д.В. Брик, Ю.В. Стефанік // Вуглехімічний журнал. – 2007. – № 1-2. – С. 49-54.

9. Ковтун Г. Комплексне використання вугілля для виробництва рідкого палива, газу та електроенергії / Г. Ковтун, А. Степанов, Г. Матусевич // Вісник НАН України. – 2008. – № 4. – С. 68-75. <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/2117>

10. Stańczuk K. Podziemne zgazowanie węgla – doświadczenia światowe i eksperymenty prowadzone w KD Barbara / K. Stańczuk, J. Dubiński, K. Cybulski, M. Wiątkowski, J. Świądkowski, K. Kapusta, J. Rogut, A. Smoliński, E. Krause, J. Grabowski // Polityka energetyczna. – 2010. – Т. 13. – З. 2. – Р. 423-433.

11. Побережський А.В. Конверсія некондиційного вугілля та відходів в контексті нарощування енергетичного потенціалу України / А.В. Побережський, М.Р. Подольський, О.В. Гвоздевич, Л.З. Кульчицька-Жигайло / Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування: матеріали Дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції (7-11 жовтня 2024 р., м. Львів). – К.: ДКЗ, 2024. – С. 334-338.

12. Рудько Г.І. Екологічна безпека вугільних родовищ України / Г.І. Рудько, О.І. Бондар [та ін.]. – Київ-Чернівці: Букрек, 2016. – 608 с.

13. Костик І.О. Переоцінка ресурсів вугілля, їх класифікація і кодифікація з метою забезпечення комп'ютерного обліку і аналізу сировинної бази вугілля України (Львівсько-Волинський басейн) станом на 01.01.2001 р / І.О. Костик / Звіт тематичної партії Львівської ГРЕ ДП «Західукргеологія». – 2001. – Т. 1. – 207 с.

14. Рудько Г.І. Перспективи нафтогазоносності України на великих глибинах / Г.І. Рудько, М.С. Махамбетова / Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування: матеріали Четвертої міжнародної науково-практичної конференції (6-10 листопада, 2017 р, м. Трускавець). – С. 54-57.

15. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р. / [Електронний ресурс]. –

Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#n6>.

16. Брик Д. Техногенні вуглевмісні об'єкти Червоноградського гірничопромислового району та деякі технічні рішення їхнього використання / Д. Брик, О. Гвоздевич, Л. Кульчицька-Жигайло, М. Подольський // Геологія і геохімія горючих копалин. – 2019. – № 4 (181). – С. 45-65. <https://doi.org/10.15407/ggcm2019.04.045>.

17. Роль і місце української енергетики у світових енергетичних процесах. – Київ, 2018 р. – 90 с. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://razumkov.org.ua/uploads/article/2018_ENERGY_P_RINT.pdf.

18. Іванців О.Є. Геологічні передумови підземної газифікації вугілля Львівсько-Волинського басейну / О.Є. Іванців, С.І. Бартошинська, А.А. Муромцева [та ін.] / У зб. Геологічні формації України та пов'язані з ними корисні копалини. – Львів, 1983. – С. 41-50.

19. Кушнірук В.А. Про підземну газифікацію вугілля Львівсько-Волинського басейну / В.А. Кушнірук, О.С. Бартошинська, С.І. Бик // Вугілля України. – 1979. – № 10. – С. 5-6.

20. Степанов А.Є. Енергетичні аспекти підземної газифікації вугілля та сланців / А.Є. Степанов, Н.Т. Рублевський, В.Н. Поляков. – К.: Видавництво АН УРСР, 1987. – 29 с.

21. Zvyagintsev K.N. Untertagevergasung von Kohle in der UdSSR / K.N. Zvyagintsev // Glukauf. – 1979. – No. 11. – S. 40-46.

22. Falbe Jü. Chemierohstoffe aus Kohle / Jürgen Falbe. – Stuttgart: Thieme, 1977. – 445 s.

23. Bastick M. Caracteres généraux de la gezéficacion des charbons / M. Bastick, J.M. Perpot, J. Weber // Enproprie. – 1983. – Vol. 113-114. – P. 127-138.

24. Стефанік Ю.В. Термодинамічні аспекти застосування водокисневого реагенту в процесі підземної газифікації вугілля / Ю.В. Стефанік, Д.В. Брик, Ю.С. Маковський, Є.С. Федоович / У зб. Геологія та геотехнологія енергетичних ресурсів України. – К.: Наукова Думка, 1988. – С. 113-121.

25. Ledent P. Filtration gasification at great depth / P. Ledent / Comission of the European Communities: Proc. of the Int. UCG Symposium 1989, European Working Group. – TU Delft. – October, 1989. – Vol. 1-3. – P. 103-116.

26. Mostade M. UCG cavity growth mechanisms at shallow and great depth: A critical evaluation / M. Mostade / Comission of the European Communities: Proc. of the Int. UCG Symposium 1989, European Working Group. – TU Delft. – October, 1989. – Vol. 1-3. – P. 161-179.

27. Стефанік Ю.В. Стан проблеми та шляхи удосконалення технології підземної газифікації вугілля / Ю.В. Стефанік / У зб. Геологічні проблеми паливно-

енергетичних ресурсів України. – К.: Наукова Думка, 1985. – С. 92-96.

28. Чекалюк Е.Б. Розробка геотехнологічних основ підземної газифікації малопотужних вугільних пластів Львівсько-Волинського басейну / **Чекалюк Е.Б., Стефаник Ю.В., Брик Д.В. [та ін.]** / Звіт про НДР. Інститут геології та геохімії горючих копалин. АН УРСР. № ГР80058060. – Львів, 1982. – Т. 2. – 219 с.

29. Bailey A.C. *Developments leading to Successful Underground Gasification in Western Europe* / **A.C. Bailey** / *Lectures of a Course on Synthetic Fuels.* . – USA: ISPRA, 1985. – P. 49-61.

Рукопис надійшов до редакції 10.09.2025

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-5-3-11

Specialty 161. U.D.C. 620.97+620.9(477)+662.66+662.611.23

PRINCIPLES OF ECOLOGICAL COAL CONVERSION

© S.D. Kalmuk¹, D.V. Bryk²

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the National Academy of Sciences of Ukraine, 3a Naukova str., Lviv, 79060, Ukraine

¹ Kalmuk Solomiya Dmytrivna, *Leading Engineer of the Laboratory of Geoecology Problems of the Department of Geology and Geochemistry of Solid Combustible Minerals (DGCM), e-mail: solomiya.kalmuk@gmail.com*

² Bryk Dmytro Vasylovich, *Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the DGCM, e-mail: dmy-trobryk@ukr.net*

The paper examines the structure of the global energy market. It notes that primary energy consumption worldwide has increased by almost 14 %. As of 2021, the largest consumers of primary energy were the Asia-Pacific region, North America and Europe. It is noted that fossil fuels (coal, oil, gas) form the basis of the global energy market structure. It is emphasised that coal has been and remains the basis of the industrial revolution in the world, despite the rapid growth of alternative energy. Forecasts show a slight increase in global coal production and a decrease in oil and gas production by 2050.

Attention is paid to the issue of energy production and consumption in Ukraine, which is linked to the need to implement the country's sustainable development goals in an environmentally and economically acceptable manner. The structure of fossil fuel reserves in Ukraine is presented, and it is noted that coal resources significantly outweigh all other types of fossil fuels (oil, gas). It is analysed that with projected coal reserves of about 117 billion tonnes, off-balance (substandard) reserves account for almost 59 billion tonnes. Therefore, the article proposes to develop these substandard coal deposits by underground gasification. This method of ecological conversion will allow significant volumes of substandard fuel and energy resources to be brought into the country's energy circulation. This will minimise damage to the environment and contribute to sustainable economic development.

The principle of solid fuel gasification is considered and it is established that the best production indicators are underground coal gasification (UCG) processes using water-oxygen and water (water vapour) reagents. The use of cheap liquid reagents, such as water (vapour), is more promising for UCG. The advantages, disadvantages and improvements of the UCG process technology are noted. Attention is focused on the possibility of further use of target gas, which mainly consists of CO and H₂, for the production of synthetic liquid fuel (SLF) using the Fischer-Tropsch method.

Keywords: global energy, energy of Ukraine, coal, substandard solid fuels, coal gasification, underground gasification, target gas.

Corresponding author: S.D. Kalmuk, e-mail: solomiya.kalmuk@gmail.com

Manuscript received 2025/09/10

**ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАЛУЧЕННЯ ВІТЧИЗНЯНОГО ВУГІЛЛЯ ЛЮБЕЛЬСЬКОГО РОДОВИЩА У ШИХТИ ДІЮЧИХ КОКСОХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ УКРАЇНИ
ПОВІДОМЛЕННЯ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ВУГІЛЛЯ ПЛАСТА П₇ ДІЛЯНКИ «ЛЮБЕЛЬСЬКА»
№ 3 ТА ВУГІЛЬНИХ КОНЦЕНТРАТІВ**

© Д.В. Мірошниченко¹, В.В. Коваль²

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)» (ДП «УХІН»), 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна

І.В. Бучинська³

Інститут геології та геохімії горючих корисних копалин НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3а, Україна

О.Л. Борисенко⁴

ДП «УХІН»

Н.В. Мукіна⁵

ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", 50095, Дніпропетровська обл., Кривий Ріг, вул. Криворіжсталі, 1, Україна

Б.Й. Покрасс⁶

ССТ Libelia, 80300, Жовква, Львівська обл., вул. Войнів УПА, 8 г, Україна

Н.Б. Бідоленко⁷, В.Д. Григор'єва⁸

ДП «УХІН»

¹ Мірошниченко Денис Вікторович, докт. техн. наук, проф., гол. наук. співр. вугільного відділу (ВВ), e-mail: dymir79@gmail.com

² Коваль Валентин Валерійович, докт. філ. (Ph.D.), с.н.с. ВВ, e-mail: kovalen79@gmail.com

³ Бучинська Ірина Володимирівна, канд. геол. наук, с.н.с. відділу геології і геохімії твердих горючих копалин, e-mail: libuchynska@ukr.net

⁴ Борисенко Олександр Людвікович, канд. техн. наук, с.н.с., в.о. директора, e-mail: zd@ukhin.org.ua

⁵ Мукіна Наталія Володимирівна, докт. філ. (Ph.D.), начальниця технічного відділу управління виробництвом КХВ, e-mail: Natalia.Mukina@arcelormittal.com

⁶ Покрасс Борис Йосипович, голова правління, e-mail: cci.libelia@gmail.com

⁷ Бідоленко Наталія Борисівна, ст. наук. співр. ВВ, e-mail: yo@ukhin.org.ua

⁸ Григор'єва Валерія. Дмитрівна, наук. співр. ВВ, e-mail: valegry72@gmail.com

Актуальність даного дослідження визначається зростаючою потребою у виробництві високоякісного доменного коксу на фоні обмежених можливостей постачання високоякісного коксівного вугілля в Україну та необхідності пошуку вітчизняної ресурсної бази для стабільного функціонування металургійного комплексу. У цих умовах дослідження вітчизняних ресурсів, зокрема рядового вугілля Любельського родовища, має стратегічне значення для забезпечення стабільності та конкурентоспроможності металургійного комплексу України.

Метою дослідження є петрологічна та технологічна оцінка потенціалу рядового вугілля Любельського родовища з точки зору його ефективної та екологічно безпечної переробки в якості високоякісної сировини для коксування.

Дослідження присвячене оцінці якості вугілля пласта п₇ ділянки «Любельська» №3 Львівсько-Волинського басейну та його придатності для використання у складі вугільних шихт на коксохімічному виробництві ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (АМКР).

Вугілля пласта п₇ досліджувалося комплексом стандартизованих методів відповідно до ДСТУ 7724:2015 та класифікації ДСТУ 3472:2015. Вивчалися петрографічні характеристики, зокрема вміст мацералів і відбивна здатність вітриніту, а також технологічні властивості – зольність, вміст сірки, вихід летких речовин, пластометричні показники, коефіцієнт розмолотості та

тиск розпирання під час коксування. Було використано комплексну методологію, що включає геологічний та петрографічний аналізи, дослідження складу мацералів та відбивної здатності вітриніту, непрямий аналіз, характеристику пластично-в'язкої поведінки та визначення індексу основності. На основі результатів вугілля з Люблінського родовища (розділ № 3, пласт № 7) було класифіковано відповідно до Міжнародної системи класифікації вугілля середнього та високого класу (бітумінозне вугілля та антрацит), затвердженої Європейською економічною комісією Організації Об'єднаних Націй (ЄЕК ООН).

Отримані результати засвідчили високий вміст вітриніту (72 %) та середній довільний показник відбивної здатності 1,21 %, що відповідає середньому ступеню метаморфізму і підтверджує коксівну цінність вугілля. Вміст золи у рядовому вугіллі становить лише 4,7 %, а сірки – 0,91 %, що є сприятливими показниками для коксування. Вугілля відзначається легкоподрібнюваністю ($HGI=76$ од.) і помірним тиском розпирання (12,8–14,2 кПа), що забезпечує безпечні умови експлуатації коксових печей.

Порівняння з іншими вугільними концентратами, що входять до шихти АМКР, виявило конкурентні переваги Любельського вугілля за якістю та економічною доцільністю використання. Його петрографічні та технологічні характеристики є зіставними з вугіллям провідних зарубіжних басейнів (США, Австралії, Чехії), що підтверджує високий промисловий потенціал родовища.

Таким чином, вугілля пласта p_7 ділянки «Любельська» №3 можна розглядати як перспективний компонент шихт для виробництва високоякісного доменного коксу на вітчизняних підприємствах.

Ключові слова: Любельське вугільне родовище, вугільні концентрати, петрографічні характеристики, стадія метаморфізму, пластометричний аналіз, міжнародна система класифікації вугілля.

Автор для листування В.В. Коваль, e-mail: kovalen79@gmail.com

Вступ

Як ми неодноразово вже відмічали наразі, в умовах обмежених можливостей щодо постачання вугілля загалом, і високоякісного коксівного вугілля зокрема, існує нагальна потреба в забезпеченні металургійного вітчизняного комплексу коксом високої якості. Адже кокс залишається незамінним компонентом доменного процесу виробництва сталі, тому стабільне постачання високоякісного коксівного вугілля має стратегічне значення для металургійного сектору України. Отже, перед нами постала задача, дослідити можливість ефективної екологічної переробки вітчизняного вугілля в складі вугільних шихт як насипного, так і трамбованого завантаження. Україна володіє значними запасами кам'яного вугілля, серед яких особливо цінним ресурсом є коксівне вугілля через його ключову роль у виробництві металургійного коксу. Основні поклади коксівного вугілля зосереджені в Донецькому вугільному басейні, додаткові ресурси – у Львівсько-Волинському регіоні. Проте через тривале інтенсивне видобування, виснаження високоякісних запасів та обмежений доступ до окремих шахт унаслідок геополітичних викликів виникає нагальна потреба в пошуку та промисловому освоєнні нових перспективних родовищ коксівного вугілля.

Любельське вугільне родовище, відкрите в 1970-х роках, розташоване в південно-західній геолого-промисловій частині Львівсько-Волинського басейну, у межах Карівської синклінали – лінійної асиметричної складки з частково зрізаним південно-західним крилом (Рис. 1). Шарнір складки хвилясто спадає на північний захід під кутом 1–3° з нерівномірним нахилом. Кути падіння південно-західного крила варіюються від 3° до 7°, а північно-східного – від 5° до 10°. Максимальна ширина складки в межах промислових вугленосних зон становить 7 км, загальна площа – 170 км², довжина – 34 км, ширина – 5 км. Геологічні дослідження свідчать, що формування родовища відбувалося в болотистих прибережних низовинах з розвинутою річковою мережею, що сприяло накопиченню торфу та утворенню промислових пластів вугілля [1].

За даними сайту компанії Lubel Coal [2] родовище характеризується значною глибиною залягання, високим ступенем метаморфізму та високою якістю коксівного вугілля. Південну частину Карівської синклінали займають шахтні поля Любельське №1–2, а суміжна ділянка Любельське №3 прилягає безпосередньо до їх північної межі. Завдяки стратегічному розташуванню – лише за 30 км від кордону з Європейським Союзом – вугілля з цього родовища має значний експортний потенціал і може конкурувати з традиційними постачальниками для європейських коксохімічних заводів.

Загальні ресурси вугілля в Любецькому регіоні оцінюються у 325,93 млн тонн, зокрема: 153,104 млн тонн балансових запасів (категорії В+С1), 82,185 млн тонн позабалансових ресурсів категорії С1 та додаткові 11,256 млн тонн позабалансових ресурсів категорії С2, розташованих поблизу тектонічних розламів.

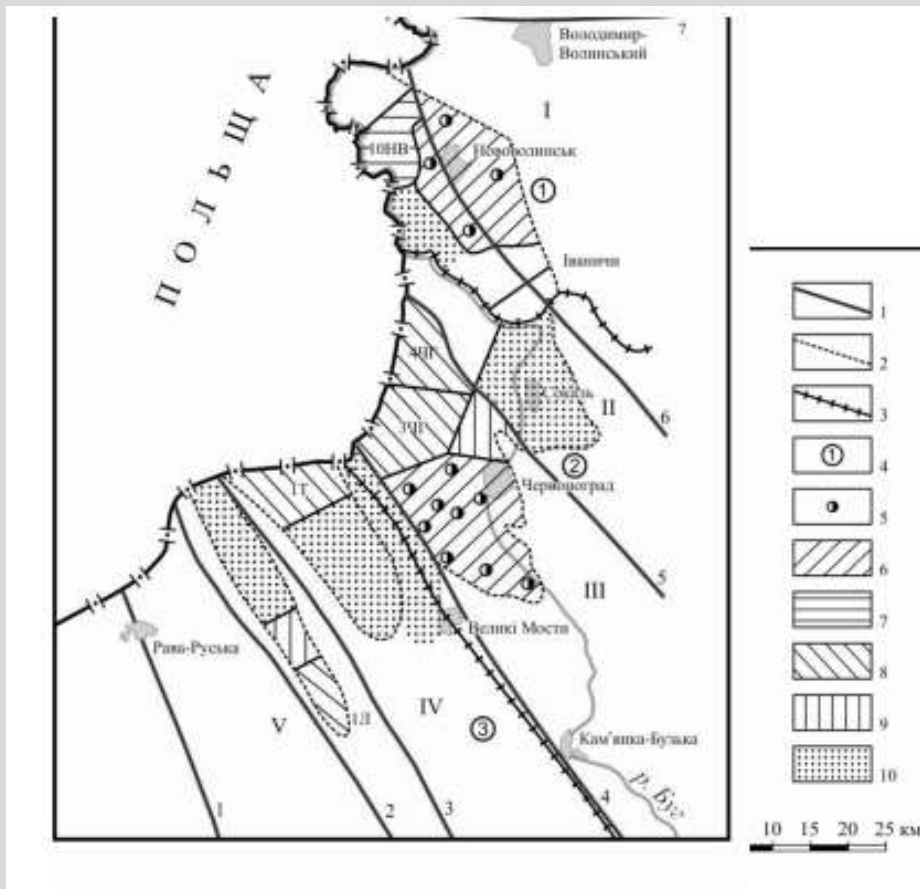


Рис. 1 Схематична геолого-промислова карта сучасного ЛВБ: 1 – тектонічні порушення (арабські цифри): розломи: 1 – Рава-Руський, 7 – Володимир-Волинський (Північний); зони насувів: 2 – Нестерівська, 3 – Бутин-Хлівчанська, 4 – Белз-Милятинська; скиди: 5 – Забузький, 6 – Волинський; 8 – Любомльський; 9 – Швацький; 10 – Піщанський; 2 – контур промислової вугленості; 3 – межі геолого-промислових і вугленосних районів; 4 – райони (арабські цифри в кружках): 1 – Ново волинський, 2 – Червоноградський, 3 – Південно-Західний; 5 – шахти; 6 – діючі шахти; 7 – шахти, які будуються; 8 – резервні ділянки для будівництва і реконструкції шахт; 9 – розвідувальні ділянки; 10 – перспективні для розвідки ділянки, площі; вугільні родовища: I – Волинське, II – Забузьке, III – Межиріченське, IV – Тягівське, V – Любельське; VI – Ковельська перспективна вугленосна площа; поля шахт: 10Н – № 10 Нововолинська, 3ЧГ – № 3 Червоноградська, 4ЧГ – № 4 Червоноградська, 1Т – № 1 Тягівська, 1Л – № 1 Любельська

Права на розробку та реалізацію проекту «Любецька шахта №1–2» належать дочірньому підприємству «СІІ Lubelia», яке має Спеціальний дозвіл на користування надрами (видобування) (дозвіл №3826 від 12 квітня 2006 року). Балансові запаси шахти №1–2 оцінюються в 153 млн тонн вугілля. Крім того, «СІІ Lubelia» мала Спеціальний дозвіл на геологічне вивчення ділянки Любельське №3 (дозвіл №4061 від 30 вересня 2011 року). За програмою розвідки у 2016 році було підготовлено геолого-економічну оцінку. Державна комісія України по запасах корисних копалин (протокол №3844 від 16 лютого 2017 року) затвердила балансові запаси вугілля категорій В+С1 на рівні 123,853 млн тонн ста-

ном на 1 січня 2017 року. Ділянка Любельське №3 розглядається як перспективне продовження ресурсної бази шахти №1–2. Проект передбачає будівництво підземної шахти та збагачувальної фабрики із річною потужністю 8 млн тонн вугілля у сирому вигляді, з яких планується отримувати 6,1–6,3 млн тонн високоякісного коксівного концентрату. Проектна потужність шахти №3 становить 3,2 млн тонн на рік. Вугілля класифікується як високоцінне, добре коксівне, середнього ступеня метаморфізму ($0,9\% < R_0 < 1,2\%$) [2,3]. З метою приведення проекту у відповідність до міжнародних стандартів, у 2008–2009 роках компанія Wardell Armstrong (Велика Британія) провела незалежну оцінку

ресурсів із використанням 3D-геологічного моделювання за стандартом JORC. Дослідження підтвердило вищий потенціал розробки, ніж очікувалося раніше, та відповідність вугілля найвищим світовим стандартам для металургійного коксу [1, 4].

Глибокі пласти містять газ метан, що має економічний потенціал. Крім того, у вугіллі Любецького родовища виявлено перспективу вилучення германію, а також виявлено ванадій, галій і кобальт у концентраціях, близьких до промислових, хоча технології їхнього видобутку поки що не розвинені [5].

Вугілля Любецького родовища визнане найвищої якості у Львівсько-Волинському басейні. Воно має низький вміст золи та сірки, хороші збагачувальні та коксівні властивості. Навіть газове вугілля з нижчим ступенем метаморфізму ($R_0 < 0,9\%$) придатне для коксування, а коксівне вугілля середнього ($0,9\% < R_0 < 1,2\%$) і високого ($1,2\% < R_0 < 1,5\%$) ступеня метаморфізму становить майже половину запасів родовища. Вугілля пласта п₇ в шахтах Любельська №1–2 та в ділянці Любельська №3 практично ідентичне за технологічними властивостями, що свідчить про їхню спільну геологічну природу. Ці пласти характеризуються низьким вмістом золи та сірки, а також оптимальними параметрами для коксохімічної промисловості.

Таким чином, усі попередні дослідження свідчать про високу промислову цінність вугілля Любецького родовища.

Отже, з метою дослідити можливість ефективної екологічної переробки вітчизняного вугілля в складі вугільних шихт як насипного, так і трамбованого завантаження ми визначали технологічні властивості вітчизняного вугілля Любецького родовища, ділянки №3 пласт п₇ щодо можливості його оптимального залучення до вугільної сировини у процесі коксування для отримання високоякісного доменного коксу на КХВ ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг».

1. Мацериали та відбивна здатність вітриніту

Об'єктом дослідження було рядове (незбагачене) вугілля з пласта №7 ділянки №3, що входить до складу Любецького родовища. Вугілля було проаналізовано з метою отримання даних щодо його ефективної та екологічно безпечної переробки як компонента вугільних сумішей для насипного та трамбованого завантаження на коксовій батареї ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» з метою виробництва високоякісного доменного коксу. До складу шихти також входило вугілля з інших басейнів, що входять до сировинної бази підприємства:

- ДП «Павлоградвугілля», Україна, марка «ДГ»;
- Arch Premium, США, марка «Ж»;
- Elk Romeo Creek, США, марка «Ж»;

- ЗФ «Свято-Варваринська», Україна, марка «К»;
- Ділянка «Любельська» №3, пласт п₇, Україна, марка «К»;
- Colombian (Excomin), США, не маркується;
- Shawara, Австралія, марка «К»;
- CSM II, Чехія, марка «К»;
- CSM, Чехія, марка «К».

Як можна побачити, з наданих для досліджень проб, по 3 проби представлено вугіллям України і США, 2 проби – вугіллям Чехії та 1 проба – Австралії.

Зазначене вугілля було досліджено комплексом стандартизованих методів згідно ДСТУ 7724:2015 «Вугілля кам'яне для коксування. Технічні умови». Перелік параметрів генетичних, технологічних та якісних характеристик вугілля згідно з міжнародною системою кодифікації вугілля середнього та високого рангів наданий в додатку вищевказаного стандарту.

У наданих зразках було уточнено марку та групу вугілля. До класифікаційних параметрів, що визначають марку та групу вугілля за класифікацією ДСТУ 3472:2015 «Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація» відносяться: середній довільний показник відбиття вітриніту (R_0), вихід летких речовин на сухий беззольний стан (V^{daf}), товщина пластичного шару (Y), індекс Рога (RI) та вища теплота згоряння на сухий беззольний (Q^{daf}_s) стан.

З 9-ти досліджених проб вугілля та вугільних концентратів 1 проба маркується як марка «ДГ»; 2 – «Ж»; 5 – «К», вугільний концентрат Colombian (Excomin) не маркується за ДСТУ 3472:2015, бо не має поєднань значень класифікаційних показників (R_0 , V^{daf} , Y).

Відбивна здатність вітриніту є важливим параметром зрілості вугілля, оскільки вона точно відображає ступінь метаморфізму та потенціал для промислового використання [6]. Як неодноразово наголошувалося в численних попередніх дослідженнях, петрографічні характеристики вугілля відіграють вирішальну роль у визначенні якості металургійного коксу під час коксування. Більшість кореляцій стосовно якості коксу базуються саме на петрографії вугілля, включаючи тип вугілля, вміст мацериалів та специфічні властивості мацериалів [7 - 10].

Петрографічний аналіз (визначення середнього показника довільної відбивної здатності вітриніту та мацериального складу) зразка вугілля з Любецького родовища, ділянка №3, пласт п₇, а також інших компонентів вугільних шихт, було проведено з використанням сучасної петрографічної системи. Ця система включає мікроскоп із збільшенням 400–500 разів у відбитому світлі, із точністю вимірювання $U = \pm 0,04\%$.

На рис. 2 представлено рефлектограму довільного показника відбивної здатності вітриніту, а на рисунку 3 – мікрофотографії мацериалів та мінеральних включень.

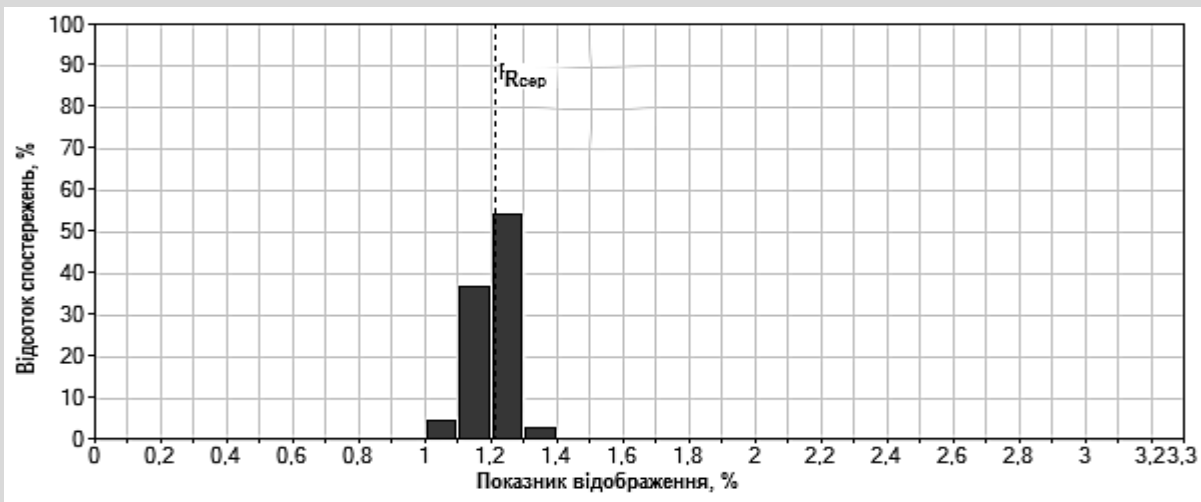


Рис. 2 Рефлектограма довільного показника відбивної здатності вітриніту: назва зразка – Вугілля Любецького родовища; дата аналізу – 11.06.2024; кількість вимірювань – 223; середнє значення – 1,211; мінімальне значення – 1,006; максимальне значення – 1,395; стандартне відхилення – 0,059; ліва площа (об'єм) – 46,97 %; права площа (об'єм) – 53,03 %. Показник відображення, % / відсоток спостережень, %: <1,000 - 1,100)/5; <1,100 - 1,200)/37; <1,200 - 1,300)/55; <1,300 - 1,400)/3

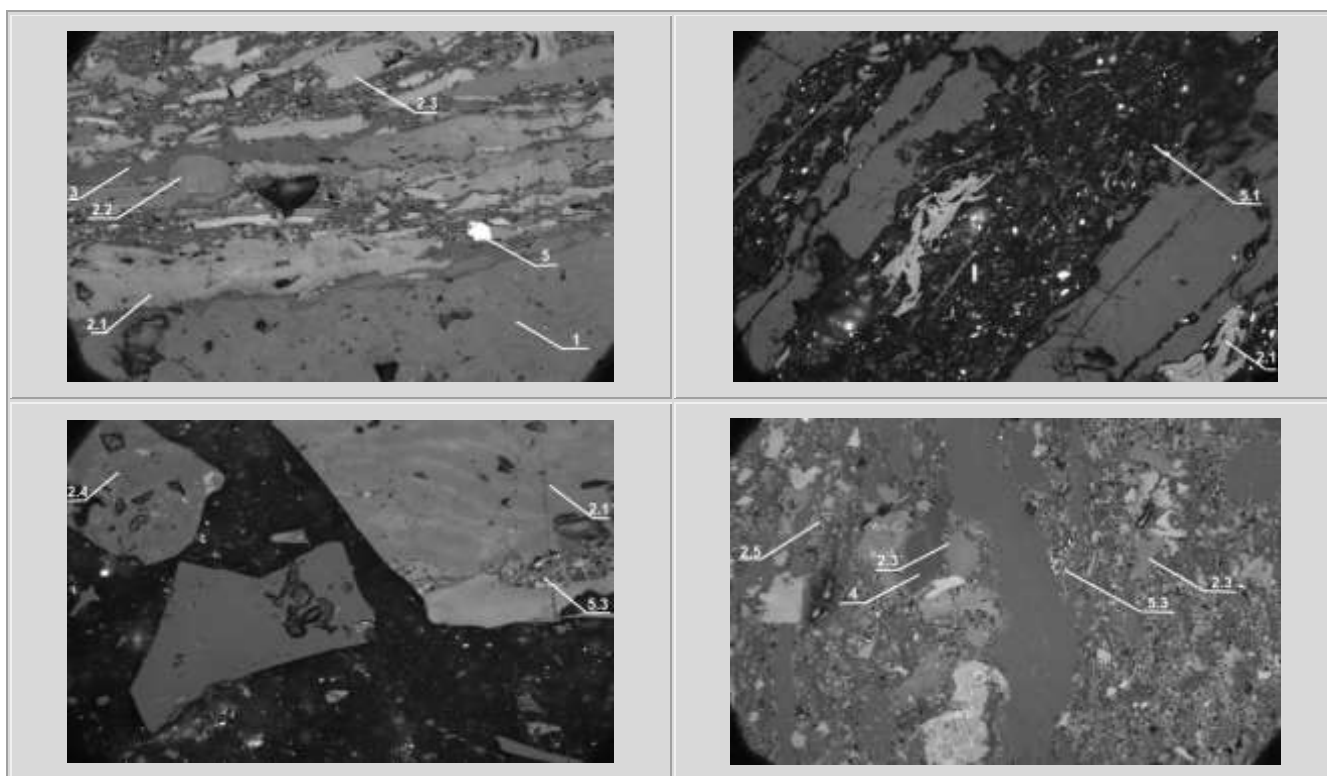


Рис. 3 Мікрофотографії мацералів, мінеральних включень та їх підкатегорій: 1 – Вітриніт (Vt); 2 – Мацерили групи інертиніту (I), де 2.1 – Фузиніт (If), 2.2 – Склеротиніт (Isc), 2.3 – Макриніт (Ima), 2.4 – Семифузиніт (Isp), 2.5 – Мікринітні включення (Imi); 3 – Семівітриніт (Sv); 4 – Ліптиніт (L); 5 – Мінеральні включення (M), де 5.1 – Глинисті мінерали (Mgl), 5.2 – Сульфіди заліза (Ms), 5.3 – Інші мінеральні включення (Mpr).

Як показали дослідження, мацеральний склад вугілля з Любельського родовища, ділянка №3, пласт п7, включає вітриніт, семівітриніт, ліптиніт та групу інертиніту. Група інертиніту, у свою чергу, представлена фузинітом, склеротинітом, макринітом, семіфузинітом, а також поодинокими включеннями мікриніту. Крім того, у зразках виявлено мінеральні включення: глини-

сті мінерали, сульфід заліза та інші мінеральні домішки.

У табл. 1 подано петрографічні характеристики вугілля ділянки «Любельська» №3, пласт п7, а також інших зразків, що входять до сировинної бази коксівного вугілля ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Таблиця 1

Петрографічна характеристика дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Петрографічний склад (без мінеральних домішок), %					Середній довільний показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту, %				
								0,50-0,79	0,80-0,89	0,90-1,19	1,20-1,49	1,50-1,69
		Vt	Sv	I	L	ΣFC		R ₀	Марки вугілля, умовно відповідні стадіям метаморфізму вітриніту			
						ДГ+Г	ГЖП+ГЖ	Ж	К	ПС		
ДП «Павлоградвугілля»	ДГ	68	1	25	6	26	0,65	100	0	0	0	0
Arch Premium	Ж	85	0	14	1	14	0,99	0	10	90	0	0
Elk Romeo Creek	Ж	75	0	20	5	20	0,92	6	40	54	0	0
ЗФ «Свято-Варваринська»	К(К1)	90	0	9	1	9	1,17	0	0	47	53	0
Colombian (Excomin)	Не маркується	85	0	14	1	14	1,19	0	0	55	45	0
CSM	К(К1)	58	0	41	1	41	1,16	0	0	75	22	3
Ділянка «Любельська» №3, пласт п7	К(К2)	72	1	26	1	27	1,21	0	0	42	58	0
Шlawarra	К(К2)	53	0	47	0	47	1,22	0	5	82	13	0
CSM II	К(К2)	41	2	57	0	59	1,30	0	0	21	79	0

Досліджений зразок вугілля з Любельської ділянки №3, пласт п7, характеризується вмістом вітриніту 72 %, інертиніту 26 %, а також по 1 % семівітриніту та ліптиніту. Таким чином, загальний вміст фузинізованих компонентів становить 27 %. Розподіл вітриніту за ступенем метаморфізму: 42 % – у діапазоні 0,90–1,19 %; 58 % – у діапазоні 1,20–1,49 %. Середній довільний показник відбивної здатності вітриніту для цього вугілля складає 1,21 %.

Таким чином, отримані петрографічні дані по вугіллю з Любельської ділянки №3, пласт п7, розширюють та водночас повністю підтверджують результати попередніх досліджень, проведених на Любельському родовищі. Мікрокомпонентний склад вугілля Любельського родовища включає всі групи мацералів. Основу складають вітринітові мацерали (60–92 %) та інертинітові (11–46 %). Серед вітринітових мацералів колотелініт значно переважає над телінітом. Семівітриніт наявний у дуже невеликих кількостях (1–2 %), в окремих рідкісних зразках – до 3–4 %. Ліптиніт представлений

переважно мікроспоринітом та зрідка мегаспоринітом. Загальний вміст ліптиніту у кілька разів менший за вміст інертиніту (1–14 % проти 1–46 %). Макриніт спостерігається епізодично у малих кількостях (1–4 %) [11].

У вітриніті Любельського вугілля переважають компоненти (75–90 %), відбивна здатність яких перебуває в межах 1,21–1,39 %. Саме ця група вітринітових мацералів визначає високу коксівну здатність дослідженого вугілля.

За результатами мацерального аналізу та петрографічно-геохімічною характеристикою, вугілля Любельського родовища подібне до вугілля Португальського басейну [12] та вугілля Єгипту [13]. За вмістом інертиніту Любельське вугілля аналогічне вугіллю Ніндун (Ningdong) із північно-західної частини басейну Ордос [14]. Крім того, низка зразків, зібраних на різних шахтах Китаю, показала петрографічні характеристики, подібні до дослідженого вугілля [15, 16]. Петрографічні дані досліджень вугілля Любельського родовища вка-

зують на його придатність для використання у вугільних шихтах для виробництва високоякісного металургійного коксу.

Результати петрографічного аналізу інших компонентів вугільних шихт (Таблиця 1) показують: вміст вітринітових мацералів: 41–90 %; вміст інертинітових мацералів: 9–57 %; вміст ліптиніту: до 6 %. Найвищий вміст вітриніту ($V_t=90$ %) зафіксовано в українського вугілля ЗФ «Свято-Варваринська». Високий вміст фузінізованих компонентів ($\Sigma FC=41-59$ %) спостерігається в австралійському вугіллі Illawarra та чеському вугіллі з шахт CSM I і CSM II. Середній довільний пока-

зник відбивної здатності вітриніту вугілля та вугільних концентратів становить від 0,65 % до 1,30 %.

2. Дослідження технологічних властивостей

Відомо, що технічний аналіз (TGA) є ефективним методом для визначення рангу вугілля та прогнозування його придатності для виробництва коксу на основі його даних (Donahue & Rais, 2009). Такі параметри аналізу, як вміст вологи, летких речовин, золи та фіксованого вуглецю суттєво впливають на способи використання вугілля та процеси його підготовки, що критично важливо для ефективного виробництва коксу (Li та ін., 2022). У табл. 2 наведено результати технічного аналізу досліджених зразків вугілля.

Таблиця 2

Технологічні властивості дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Технічний аналіз, %				Пласто-метричні показники, мм		Показник окиснення, °C	Коефіцієнт розмолотості за Хардгровим, од.	Тиск розпирання,* кПа	
		W ^a	A ^d	S ^d _t	V ^{daf}	X	Y			Δt	HGI
ДП «Павлоградвугілля»	ДГ	6,4	6,5	1,20	41,6	52	9	4	39	1,6	0,0
Arch Premium	Ж	1,7	7,8	1,03	34,2	19	29	2	54	3,8	3,6
Elk Romeo Creek	Ж	1,5	7,7	0,80	34,0	18	19	4	51	4,4	3,9
ЗФ «Свято-Варваринська»	К(К1)	1,7	8,9	0,74	27,4	16	14	5	57	18,8	15,3
Colombian (Excomin)	Не маркується	1,6	8,6	0,75	27,3	12	12	5	59	27,8	42,4
CSM	К(К1)	1,2	7,4	0,60	25,7	24	16	4	59	13,0	15,6
Ділянка «Любельська» №3, пласт п7	К(К2)	1,5	4,7	0,91	24,5	20	17	5	76	12,8	14,2
Illawarra	К(К2)	1,5	9,6	0,49	26,6	29	15	2	62	7,3	8,8
CSM II	К(К2)	1,1	6,0	0,46	22,4	24	14	4	72	9,7	7,8

Аналізуючи дані, наведені у табл. 2, можна зробити висновок, що зольність досліджених проб (A^d) становить 4,7–9,6 %. Вміст загальної сірки (S^d) 0,46–1,20 %. Найвищий вміст загальної сірки спостерігається у пробі вугілля із ДП «Павлоградвугілля» (марка «ДГ») і дорівнює 1,20 %. Вихід летких речовин (V^{daf}) на сухий беззольний стан палива варіюється від 22,4 % у вугільного концентрату марки «К» CSM II до 41,6 % у концентрату ДП «Павлоградвугілля» марки «ДГ». Досліджене вугілля і вугільні концентрати характеризуються широким діапазоном товщини пластичного шару від 9 до 29 мм. Найбільша товщина пластичного шару зафіксована у американського вугілля Arch Premium ($Y=29$ мм). Характеризуючи пластометричну криву цього вугілля, слід зазначити, що вона має горбоподібний характер, властивий для типового жирного вугілля.

Величина Δt дослідженого вугілля та вугільних концентратів знаходиться в діапазоні від 1 до 5 °C. Отже

можна зробити висновок, що вугілля та вугільні концентрати не окиснені $\Delta t \leq 6$ °C [17, 18].

Для визначення коефіцієнта розмолотості застосовують метод Хардгрова. За величиною коефіцієнта розмолотості все вугілля умовно розподіляється на три категорії: міцне, середньо- і легкоподрібнюване [19]. До міцного відноситься вугілля з величиною показника HGI менше ніж 50 од., середньоподрібнюваного – 50–65 од. та легкоподрібнюваного – 65–100 од. Результати визначення коефіцієнта розмолотості за Хардгровом коливалися в межах 39–76 од. Найвищий показник 76 од. має вугілля ділянки «Любельська» №3, пл. п7, що відносить його до легкоподрібнюваного.

Визначення тиску розпирання вугілля та вугільних концентратів виконували в лабораторній уніфікованій установці ДП «УХІН» згідно з ДСТУ 8724:2017 «Вугілля кам'яне та шихти на його основі. Метод визначен-

ня тиску розпирання, який виникає під час коксування».

Завантаження проби у камеру коксування реторти відбувається гравітаційним (насіпним) методом або трамбованим методом.

Результати визначення величини тиску розпирання коливалися в межах 1,6–27,8 кПа при завантаженні гравітаційним (насіпним) методом та 0–42,4 кПа при завантаженні трамбованим методом. Вважаємо за доцільне перед дозуванням вугільних концентратів ЗФ «Свято-Варваринська» (марка К) і Colombian (Excomin) (не маркується) в шихту попередньо визначити тиск розпирання, щоб дотриматися безпечних механічних навантажень на вогнетривку кладку опалювальних простіноків. В більшості проектів коксових печей ця величина прийнята на рівні 7 кПа [20, 21], тож за можливості вугільний концентрат Colombian (Excomin) за показником тиску розпирання ($P_n=27,8$ кПа; $P_{10}=42,4$ кПа) варто не рекомендувати до складу виробничої шихти [22].

Щодо вугілля з ділянки №3 Любельського родовища, пласт n7, його характеризують такі показники технічного аналізу: вміст сірки – 0,91 %; вихід летких речовин – 24,5 %; товщина пластичного шару – 17 мм; індекс окиснення – 5 °С; індекс подрібнюваності за Хардгровом – 76 (найвищий серед усіх аналізованих зразків), що відповідає категорії легкоздрібнюваного вугілля; тиск розпирання – 12,8 кПа при гравітаційному завантаженні та 14,2 кПа при трамбованому завантаженні у коксовій камері. Варто також відзначити низький вміст золи у рядовому вугіллі – лише 4,7 %, що

усуває потребу в додатковому збагаченні та робить це вугілля економічно привабливою складовою шихти для переробки та подальшого коксування. За вмістом сірки та золи це вугілля подібне до американського вугілля *Springfield*, зразки якого варіюються за зольністю (на суху масу) від 3,5 % і вмістом сірки — від 0,6 % [23], а також до деяких зразків вугілля з різних шахт Китаю, які, за даними досліджень, належать до низькозольних або середньозольних вугілля, більшість з яких мають вміст сірки менше ніж 1,50 % [24].

Результати елементного аналізу (табл. 3) свідчать, що вміст вуглецю та кисню у зразках вугілля з ділянки №3 Любельського родовища, пласт n7, а також у вугільних концентратах, що використовуються у виробничих шихтах ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", корелює зі ступенем метаморфізму вугілля. Добре відомо, що зі зростанням вмісту вуглецю в органічній речовині відбувається відповідне зниження вмісту кисню. Така тенденція свідчить про процес збагачення вугілля вуглецем та дегідрування під час його вуглефікації [25, 26]. Отримані результати демонструють, що зі збільшенням ступеня метаморфізму вміст вуглецю на поверхні вугілля зростає, а вміст кисню – зменшується. Ця закономірність узгоджується з даними елементарного аналізу, що підкреслює чітку залежність між підвищеною метамерфонізованістю вугілля та зростанням співвідношення вуглець/кисень. Зокрема, зі зростанням ступеня метаморфізму вміст вуглецю підвищується з 83,65 % до 89,55 %, тоді як вміст кисню відповідно зменшується з 8,30 % до 3,66 %.

Таблиця 3

Елементний склад та теплота згоряння дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Елементний склад (сухий беззольний стан), %					Найвища теплота згоряння, МДж/кг
		C ^{daf}	H ^{daf}	N ^{daf}	S _t ^d	O _d ^{daf}	
ДП «Павлоградвугілля»	ДГ	83,65	5,42	1,43	1,20	8,30	34,7
Arch Premium	Ж	86,78	5,79	1,55	1,03	4,85	36,0
Elk Romeo Creek	Ж	86,88	5,55	1,64	0,80	5,13	35,8
ЗФ «Свято-Варваринська»	К(К1)	87,19	5,15	1,68	0,74	5,24	35,7
Colombian (Excomin)	Не маркується	86,15	5,00	1,87	0,75	6,23	35,5
CSM	К(К1)	88,93	4,87	1,44	0,60	4,16	36,2
Ділянка «Любельська» №3, пласт n7	К(К2)	88,28	4,95	1,48	0,91	4,38	36,0
Шawarra	К(К2)	87,86	4,99	1,76	0,49	4,90	35,9
CSM II	К(К2)	89,55	4,81	1,52	0,46	3,66	36,3

У табл. 3 також наведено результати аналізу теплоти згоряння на суху беззольну масу (Q_{daf_s}), які варіюються в межах від 34,7 до 36,3 МДж/кг.

3. Характеристика пластично-в'язких властивостей

Пластичні властивості вугілля відіграють вирішальну роль у визначенні якості отриманого коксу [27].

Наприклад, [28, 29] досліджували термопластичну поведінку сильно спікаючого вугілля та її вплив на структуру коксу, підкреслюючи значення фази метастау та поверхневого натягу. Аналогічно, [30, 31] проаналізували взаємозв'язок між якістю вугілля та його термопластичними характеристиками, акцентуючи увагу на ролі мацерального складу та вмісту легких речовин у формуванні пластичності вугілля, а [32] вказував на визначальну роль пластичних властивостей на основі випробувань за методом пласметрії Гізелера.

Виходячи з даних, що представлені у табл. 4, можна констатувати, що всі досліджені вугілля та концентрати, мають здатність приймати піснуваті присадки, що знаходять відображення у відповідному рівні показників, отриманих за методами Рога та Грей-Кінга. У ході термохімічних перетворень вони виявляють здатність

спучуватися, що фіксується методами вільного спучування (FSI) та Одібера-Арну. Індекс вільного спучування (FSI) є одним із параметрів, прийнятих у Міжнародній кодифікації вугілля.

Максимальне розширення (дилатацію), що фіксується методом Одібера-Арну ($b=296\%$), максимальну плинність пластичної маси, що утворюється ($F=61937$ поділів шкали в хвилину, dd/xv), найменшу початкову температуру розм'якшення – $337\text{ }^\circ\text{C}$, найбільше значення інтервалу пластичності ($\Delta t=117\text{ }^\circ\text{C}$) має вугілля Arch Premium (марка «Ж»). Найнижчі показники має вугілля ДП «Павлоградвугілля» (марка «ДГ») та вугілля CSM II (марка «К»). В останньому випадку із-за наявності великої кількості мацералів групи інертніту, що не спікаються в органічній масі аналізованого вугілля (табл.1).

Таблиця 4

Характеристика пластично-в'язких властивостей дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Індекс спікання за методом Рога, од.	Тип коксу за Грей-Кінгом	Індекс вільного спучування, год	Дилатація за Одібера-Арну					Показники плинності за Гізелером				
		RI	GK	FSI	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_{II}, ^\circ\text{C}$	$t_{III}, ^\circ\text{C}$	a, %	b, %	$F_{max}, dd/min$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_{max}, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$
ДП «Павлоградвугілля»	ДГ	27	C	2	404	436	445	29	-21	11	404	428	450	46
Arch Premium	Ж	76	>G8	8 1/2	358	413	470	33	296	61937	367	445	484	117
Elk Romeo Creek	Ж	68	G7	8 1/2	364	421	477	25	139	16054	395	440	479	84
ЗФ «Свято-Варваринська»	К(К1)	50	G3	7	407	445	477	27	51	44	414	454	483	69
Colombian (Excomin)	Не маркується	46	F	5 1/2	420	453	476	13	16	10	420	457	477	57
CSM	К(К1)	58	G2	7 1/2	397	441	480	25	74	852	404	457	491	87
Ділянка «Любельська» №3, пласт п7	К(К2)	68	G4	8 1/2	385	443	478	27	48	114	415	460	494	79
Шawarra	К(К2)	52	G2	8	385	438	474	23	48	788	401	452	488	87
CSM II	К(К2)	49	F	6 1/2	422	445	478	48	23	7	436	463	490	54

Вугілля ділянки № 3 «Любельська», пласт п7, характеризується індексом Рога 68 одиниць, класифікується як вугілля марки G4 за методом Грея-Кінга, має індекс вільного спучування $8\frac{1}{2}$ одиниць, дилатацію – 48 % за методом Одібера-Арну, максимальну плинність пластичної маси – 114 dd/xv , температуру початку розм'якшення – $415\text{ }^\circ\text{C}$ та інтервал пластичності – $79\text{ }^\circ\text{C}$. Виходячи з наших результатів та попередніх досліджень, у яких було показано вплив плинності вугілля на якість коксу та доведено, що вища плинність покращує механічні властивості коксу а [33], пласто-в'язкі характеристики вугілля з Любельського родовища разом із зафіксованою товщиною пластичного шару в 17

мм дозволяють класифікувати це вугілля як типове високо-коксівне вугілля.

4. Визначення індексу основності досліджуваного вугілля

Визначення хімічного складу та плавкості золи (табл. 5) показало, що у процесі озолення вугілля мінеральні компоненти зазнають ряду хімічних перетворень. В результаті виходить складний композиційний продукт, що складається, в основному, з наступних оксидів: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 . Цей параметр якості вугілля є критично важливим через його вплив на якість металургійного коксу, отрима-

ного внаслідок переробки вугілля. Для оцінки цього параметра використовується індекс основності, який є базовим при розрахунках таких важливих показників, як реакційна здатність коксу (CRI) та міцність коксу після реакції (CSR).

Для визначення індексу основності вугілля (I_b) користуються формулою (1):

$$I_b = \frac{A^d 100(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O)}{(100 - V^{daf})(SiO_2 + Al_2O_3)}, \quad (1)$$

де A^d – зольність, V^{daf} – вихід летких речовин.

На підставі індексу основності розраховують значення показника реакційної здатності CRI і післяреакційної міцності CSR за формулами (2) і (3):

$$CRI = 13,4 + 9,35I_b - 0,45I_b^2, \quad (2)$$

$$CSR = 94,23 - 1,275CRI. \quad (3)$$

Як видно з табл. 5, досліджене вугілля і концентрати значно відрізняються за індексом основності вугілля (I_b) і основно-кислотним відношенням (R_{ba}): $I_b=1,53-4,99$; $R_{ba}=0,129-0,497$.

Таблиця 5

Хімічний склад і плавкість золи дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Хімічний склад золи, %									Індекси основності		Плавкість золи, °C		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	I_b	R_{ba}	температура деформації	температура півфери	температура рідкоплавкого стану	
															$t_{A(ox)}$
ДП «Павлоградвугілля»	ДГ	47,5	21,5	14,95	1,15	5,05	0,97	1,83	3,5	4,99	0,347	1248	1290	1338	
Arch Premium	Ж	42,53	29,50	17,09	0,60	2,58	0,78	1,04	1,97	4,15	0,307	>1500	>1500	>1500	
Elk Romeo Creek	Ж	56,39	25,50	6,98	0,25	0,70	0,77	2,37	1,44	1,58	0,135	>1500	>1500	>1500	
ЗФ «Свято-Варваринська»	К(К1)	53,5	26,1	3,74	1,47	1,41	0,97	3,47	1,01	1,70	0,139	1498	>1500	>1500	
Colombian (Excomin)	Не маркується	52,40	27,5	8,09	1,35	1,37	0,96	3,14	1,15	2,21	0,187	1334	1422	1450	
CSM	К(К1)	47,03	26,77	12,47	2,77	3,15	1,20	2,09	2,67	2,93	0,294	1380	1434	1468	
Ділянка «Любельська» №3, пласт п7	К(К2)	45,30	25,80	10,72	1,40	5,26	0,99	1,67	5,66	1,75	0,282	1285	1385	1394	
Шawarra	К(К2)	50,98	30,45	7,71	0,49	2,63	0,75	0,92	0,84	2,01	0,154	>1500	>1500	>1500	
CSM II	К(К2)	42,07	17,85	13,96	4,28	8,76	1,52	1,27	8,19	3,84	0,497	1369	1441	1479	

П'ять проб з дослідженого вугілля та вугільних концентратів, а саме: Elk Romeo Creek, ЗФ «Свято-Варваринська», Colombian (Excomin), Шawarra та ділянка «Любельська» №3, пл. п7, мають значення індексу основності вугілля $I_b < 2,5$. Практика показала, що для отримання низькорекційного металургійного коксу необхідне використання шихти з низькими значеннями індексу основності [25]. Так, саме при значеннях $I_b \leq 2,5$ для вугільної шихти в цілому можна досягати значень реакційної здатності $CRI \leq 35\%$ та післяреакційної міцності $CSR \geq 50\%$ у коксі, що відповідає за цими показниками сучасним вимогам доменного виробництва. Концентрати ДП "Павлоградвугілля", Arch Premium, CSM і CSM II, індекс основності яких перевищує 2,5, мають обмежену придатність для подальшого коксування та потребують ретельної оцінки допустимої частки в загальній шихті.

Хімічний склад золи також є одним з найважливіших факторів, що впливають на температури плавкості золи, які наведені у табл. 5.

5. Кодифікація вугілля відповідно до Міжнародної системи (Комітет ООН з питань Європейської економіки – UNECE)

Міжнародна система кодифікації вугілля середнього та високого рангів, тобто, кам'яного вугілля та антрацитів, була затверджена Комітетом з питань Європейської економіки (ЄЕК) Організації Об'єднаних Націй у 1988 р. 14-знаковий код визначається на основі восьми основних генетичних, технологічних та якісних параметрів вугілля:

- *перші дві цифри* – середній довільний показник відбиття вітриніту;

- *третя цифра* – характеристика рефлектограми – кількість розривів та стандартний відхил стадій метаморфізму вітриніту;
 - *четверта і п'ята цифри* – мацеральний склад, %;
 - *шоста цифра* – індекс вільного спучування;
 - *сьома і восьма цифри* – вихід летких речовин на сухий беззолний стан палива;
 - *дев'ята і десята цифри* – зольність на сухий стан палива;
 - *одинадцята і дванадцята цифри* – сірка загальна на сухий стан палива;

- *тринадцята і чотирнадцята цифри* – найвища температура згоряння на сухий беззолний стан палива.

Ця структурована система кодифікації забезпечує компактне, але водночас всебічне представлення характеристик вугілля, полегшуючи класифікацію, торгівлю та оцінку придатності для конкретних промислових цілей, таких як коксування чи спалювання.

На основі отриманих даних досліджене вугілля було класифіковане відповідно до затвердженої Системи кодифікації вугілля. В табл. 6 наведені 14-значні номери коду по міжнародній системі кодифікації вугілля (комітет ЄЕК ООН) для кожного дослідженого зразка.

Таблиця 6

Кодові номери вугілля згідно з Міжнародною системою кодифікації (Комітет UNECE)

Постачальник	Марка	Номер коду за міжнародною системою кодифікації вугілля (комітет ЄЕК ООН)
ДП «Павлоградвугілля»	ДГ	06 0 22 2 40 08 12 34
Arch Premium	Ж	09 0 11 8 34 08 10 36
Elk Romeo Creek	Ж	09 0 22 8 34 07 08 35
ЗФ «Свято-Варваринська»	К(К1)	11 1 01 7 26 08 07 35
Colombian (Excomin)	Не маркується	11 1 11 5 26 08 07 35
Шлаварра	К(К1)	10 1 30 8 26 09 04 35
CSM	К(К1)	11 1 41 7 24 07 06 36
Ділянка «Любельська» №3, пласт п7	К(К2)	12 0 21 8 24 04 09 36
CSM II	К(К2)	13 1 50 6 22 06 04 36

Аналізуючи дані, наведені у табл. 6, можна зробити висновок, що вугілля (не збагачене) ділянки «Любельська» № 3, пласт п7 має номер коду 12 0 21 8 24 04 09 36, що означає його високу придатність в якості сировини для коксування за показниками петрографічного аналізу та технічного аналізу. Зокрема, вугілля характеризується низькою зольністю – 04 (діапазон 4,0–4,9 %) і невисоким рівнем загальної сірки 09 (діапазон 0,90 – 0,99 %). Інші зразки вугілля, наведені в табл. 7.6, можуть бути інтерпретовані аналогічним чином на основі відповідних числових кодів.

В наступній публікації ми плануємо викласти результати досліджень вихідних промислових шихт (насіпної та трамбованої) із залученням вугілля пласта п7 ділянки «Любельська» №3, а також оцінити його вплив на якісні характеристики отриманого коксу.

Висновки

На підставі виконаних досліджень, можна сформулювати наступне:

1. Вугілля пласта п7 ділянки «Любельська» №3 характеризується низьким вмістом золи (4,7 %) і сірки (0,91 %), що зменшує потребу у збагаченні та підвищує його економічну привабливість.

2. Петрографічний аналіз ($R_0 = 1,21$ %, вміст вітриніту 72 %) підтвердив добру коксівну здатність і відповідність міжнародним стандартам.

3. Вугілля має високу розмолоздатність ($HGI = 76$) і помірний тиск розпирання, що забезпечує ефективність та безпеку у виробничих умовах.

4. Результатами досліджень встановлена марочна приналежність вугілля ділянки «Любельська» № 3, пласт п7 (марка К(К2)) за ДСТУ 7724:2015. Також визначено код класифікації даного рядового вугілля за Міжнародною системою класифікації комітету ЄЕК ООН (UNECE). Незбагачене вугілля ділянки «Любельська» № 3, пласт п7, має номер коду 12 0 21 8 24 04 09 36, що означає його привабливість як сировини для коксування за показниками петрографічного та технічного аналізу – зокрема, низьким вмістом золи (04 – у межах 4,0–4,9 %) та помірним вмістом загальної сірки (09 – у межах 0,90–0,99 %).

5. За якісними характеристиками Любельське вугілля є конкурентоспроможним із закордонними аналогами та може постати стратегічним джерелом для української коксохімії.

Бібліографічний список

1. **Matrofoylo M.** Commercial potential for coal presence in the lower part of Carboniferous deposits of the Lviv-Volyn Basin / **M. Matrofoylo, I. Buchynska, A. Poberezhskyy, O. Stupka, I. Yatsenko, O. Shevchuk, I. Kudrych** // *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*. – 2021. – No. 3–4. – P. 73–91. <https://doi.org/10.15407/ggcm2021.03-04.073>.
2. **Lubel Coal Company.** Website. – Available online: [<https://www.lubelcoal.com>] (<https://www.lubelcoal.com>) (accessed May 2025).
3. **Vivcharenko O.V.** Restructuring of coal industry in Ukraine / **O.V. Vivcharenko** // *Minerals of Mineral Deposits*. – 2014. – Vol. 8. – No. 1. – P. 7–12. <https://doi.org/10.15407/mining08.01.007>.
4. **Shlapinsky V.** Geological structure and prospects of oil-gas presence at the Pohar plot (Folded Carpathians) / **V. Shlapinsky, M. Pavlyuk, Y. Lazaruk, O. Savchak, M. Ternavsky** // *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*. – 2021. – No. 3–4. – P. 5–15. <https://doi.org/10.15407/ggcm2021.03-04.005>.
5. **Бучинська І.В.** Комплексний розвиток пов'язаних мінералів та компонент вугілля родовища Любеля Львівсько-Волинського басейну / **І.В. Бучинська, М.М. Матрофайло, А.В. Побережський** // *Вісник Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Геологія*. – 2023. – Вип. 2 (101). – С. 62–67. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.101.09>.
6. **Mukhopadhyay P.K.** Vitrinite Reflectance as a Maturity Parameter / **P.K. Mukhopadhyay, W.G. Dow (Eds.)** // *ACS Symposium Series*, vol. 570. – Washington: American Chemical Society, 1994. <https://doi.org/10.1021/bk-1994-0570>.
7. **Chen Y.** A review of the state-of-the-art research on carbon structure evolution during the coking process: From plastic layer chemistry to 3D carbon structure establishment / **Y. Chen, S. Lee, A. Tahmasebi, J. Bai, M. Mahoney, J. Yu** // *Fuel*. – 2020. – Vol. 271. – P. 117657. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117657>.
8. **Sadeghtabaghi Z.** Prediction of vitrinite reflectance values using machine learning techniques: A new approach / **Z. Sadeghtabaghi, M. Talebkeikhah, A.R. Rabbani** // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2021. – Vol. 11. – P. 651–671. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-01043-8>.
9. **Lomas H.** Petrographic analysis and characterisation of a blast furnace coke and its wear mechanisms / **H. Lomas, R. Roest, S. Gupta, R.A. Pearson, R. Fetscher, D.R. Jenkins, R. Pearce, R. Kanniala, M.R. Mahoney** // *Fuel*. – 2017. – Vol. 200. – P. 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.02.100>.
10. **Malumbazo N.** The petrographic determination of reactivity differences of two South African inertinite-rich lump coals / **N. Malumbazo, N.J. Wagner, J.R. Bunt** // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2012. – Vol. 93. – P. 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.10.008>.
11. **Узіюк В.І.** Вихідний рослинний матеріал, петрографічний склад, вихід та відбивна здатність вугілля пласта вб Львівсько-Волинського басейну / **В.І. Узіюк** // *Вісник Львівського університету. Серія геологічна*. – 2009. – Вип. 23. – С. 126–140.
12. **Ribeiro J.** Petrographic and geochemical characterization of coal from Santa Susana Basin, Portugal / **J. Ribeiro, G. Machado, N. Moreira, I. Suárez-Ruiz, D. Flores** // *International Journal of Coal Geology*. – 2019. – Vol. 203. – P. 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.01.005>.
13. **Mousa D.A.** Discovery of an extraordinary Carboniferous cutinite-rich coal seam from Wadi Abu Thora, southern Sinai, Egypt: Organic petrographical and geochemical characterization / **D.A. Mousa, W.A. Makled, T. Gentzis, N.S. Gad, J. Samaan** // *International Journal of Coal Geology*. – 2022. – Vol. 250. – P. 103908. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103908>.
14. **Du F.** Petrographical and geochemical characterization of the inertinite-rich coal from the Ningdong Coalfield, Northwest Ordos Basin, China / **F. Du, S. Ning, C. Liu, et al.** // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2019. – Vol. 12. – P. 36. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4174-2>.
15. **Guo X.** Study on petrographic characteristics of devolatilization char/coke related to coal rank and coal maceral / **X. Guo, Y. Tang, C.F. Eble, Y. Wang, P. Li** // *International Journal of Coal Geology*. – 2020. – Vol. 227. – P. 103504. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103504>.
16. **Song X.** Petrography, mineralogy, and geochemistry of thermally altered coal in the Tashan Coal Mine, Datong Coalfield, China / **X. Song, H. Ma, B.M. Saalidong, K. Li** // *Minerals*. – 2021. – Vol. 11 (9). – P. 1024. <https://doi.org/10.3390/min11091024>.
17. **Pyshyev S.** Effect of hydrodynamic parameters on the oxidative desulphurization of low rank coal / **S. Pyshyev, Y. Prysiazhnyi, M. Shved, M. Kulażyński, D. Miroshnichenko** // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2018. – Vol. 5 (2). – P. 213–229. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0205-6>.
18. **Zubkova V.** The influence of long-term storage on thermal behaviour of lower rank coal on the example of Polish coal. Part 1. The influence of long-term storage (LTS) of a lower rank coal on changes in volume of carbonized charge and changes in structural chemical parameters of pyrolysis products / **V. Zubkova, A. Strojwas, M. Jozwiak** // *Fuel*. – 2017. – Vol. 188. – P. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.035>.
19. **Miroshnichenko D.** Effect of the quality indices of coal on its grindability / **D. Miroshnichenko, V. Koval, O. Bogoyavlenska, S. Pyshyev, E. Malyi, M. Chemerinskiy** // *Minerals of Mineral Deposits*. – 2022. – Vol. 16 (4). – P. 40–46. <https://doi.org/10.33271/mining16.040>.

20. **Gagarin S.G.** Pressure generation in coking furnaces: A review / **S.G. Gagarin** // *Coke and Chemistry*. – 2011. – Vol. 54. – P. 193–203. <https://doi.org/10.3103/S1068364X11060020>.
21. **Miroshnichenko D.** Factors affecting the formation of the carbon structure of coke and the method of stabilizing its physical and mechanical properties / **D. Miroshnichenko, K. Shmeltser, M. Kormer** // *C–Journal of Carbon Research*. – 2023. – Vol. 9 (3). – P. 66. <https://doi.org/10.3390/c9030066>.
22. **Nomura S.** The effect of swelling pressure during coal carbonization on coke porosity / **S. Nomura, K.M. Thomas** // *Fuel*. – 1996. – Vol. 75 (2). – P. 187–194. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00238-3](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00238-3).
23. **Eble C.F.** Geochemical, petrographic and palynologic characteristics of two late middle Pennsylvanian (Asturian) coal-to-shale sequences in the eastern Interior Basin, USA / **C.F. Eble, S.F. Greb** // *International Journal of Coal Geology*. – 2018. – Vol. 190. – P. 99–125. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.09.003>.
24. **Guo X.** Study on petrographic characteristics of devolatilization char/coke related to coal rank and coal maceral / **X. Guo, Y. Tang, C.F. Eble, Y. Wang, P. Li** // *International Journal of Coal Geology*. – 2020. – Vol. 227. – P. 103504. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103504>.
25. **Руднев Ю.** Матеріальний баланс метаморфічних перетворень вугільних пластів та їх небезпечні властивості / **Ю. Руднев, Є. Філатієва, М. Антощенко, В. Попович** // *Геофізичний журнал*. – 2024. – Т. 46. – № 3. – С. 85–110. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.298964>.
26. **Zhou G.** Effects of oxygen element and oxygen-containing functional groups on surface wettability of coal dust with various metamorphic degrees based on XPS experiment / **G. Zhou, C. Xu, W. Cheng, Q. Zhang, W. Nie** // *Journal of Analytical Methods in Chemistry*. – 2015. – Vol. 2015. – P. 467242. <https://doi.org/10.1155/2015/467242>.
27. **Brewer R.E.** Plasticity of coals – Its measurement and relation to quality of coke produced / **R.E. Brewer, R.G. Atkinson** // *Industrial and Engineering Chemistry Analytical Edition*. – 1936. – Vol. 8 (6). – P. 443–449. <https://doi.org/10.1021/ac50104a014>.
28. **Cui B.** A study of coking mechanism based on the transformation of coal structure / **B. Cui, Y. Shen, J. Guo, X. Jin, M. Wang, W. Xie, L. Chang** // *Fuel*. – 2022. – Vol. 328. – P. 125360. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125360>.
29. **Sun W.** A study on thermoplastic property of strongly caking coals and its influence on coke structures / **W. Sun, P. Cui, M. Zheng, X. Zhang** // *Coke and Chemistry*. – 2022. – Vol. 65. – P. 150–160. <https://doi.org/10.3103/S1068364X2204007X>.
30. **Ghosh B.** Influence of coke structure on coke quality using image analysis method / **B. Ghosh, B.K. Sahoo, B. Chakraborty, et al.** // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2018. – Vol. 5. – P. 473–485. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0227-0>.
31. **Sahoo M.** Significance of coal quality on thermoplastic properties: a case study / **M. Sahoo, T. Bhowmick, V. Mishra, S. Pal, M. Sharma, S. Chakravarty** // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. – 2022. – Vol. 42 (4). – P. 1015–1032. <https://doi.org/10.1080/19392699.2019.1678470>.
32. **Guelton N.** The prediction of the Gieseler characteristics of coal blends / **N. Guelton** // *Fuel*. – 2017. – Vol. 209. – P. 661–673. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.017>.
33. **Kumar P.P.** Influence of coal fluidity on coal blend and coke quality / **P.P. Kumar, S.C. Barman, S. Singh, M. Ranjan** // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2008. – Vol. 35 (6). – P. 416–420. <https://doi.org/10.1179/174328108X335113>.
34. **Miroshnichenko D.** Industrial technology development features of the stamped coal blend coking / **D. Miroshnichenko, M. Cherkashyna, A. Sokolova, I. Shulga, S. Kravchenko, K. Gorbunov, A. Sakun, O. Zhuha, V. Lebedev** // *Multidisciplinary Science Journal*. – 2025. – Vol. 7 (1). – P. e2025009. <https://doi.org/10.31893/multiscience.2025009>.

Рукопис надійшов до редакції 11.07.2025

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-5-12-26

Specialty 161. U.D.C. 662.749.2; 662.74

JUSTIFICATION OF THE INCLUSION OF DOMESTIC COAL OF THE LUBELSKIE FIELD IN THE BOILERS OF OPERATING COKE-CHEMICAL ENTERPRISES OF UKRAINE

Report 1. RESEARCH OF THE QUALITY OF COAL OF THE P7 SEAM OF THE “LUBELSKIE” SITE No. 3 AND COAL CONCENTRATES

© **D.V. Miroshnychenko¹, V.V. Koval²**

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

I.V. Buchynska³

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the National Academy of Sciences of Ukraine, 79060, Lviv, 3a Naukova St., Ukraine

O.L. Borysenko⁴

SE "UKHIN"

N.V. Mukina⁵

PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih", 50095, Dnipropetrovsk Region, Kryvyi Rih, 1 Kryvorizhstali St., Ukraine

B.Yo. Pokrass⁶

CCI Lubelia, 80300, Lviv Region, Zhovkva, 8 St. Voyniv UPA, Ukraine

N.B. Bidolenko⁷, **V.D. Grigor'eva**⁸

SE "UKHIN"

¹ Miroshnychenko Denis Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Prof., Chief Researcher of Coal Department (CD), e-mail: dvmir79@gmail.com

² Koval Valentyn Valeriyovich, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher of CD, e-mail: kovalen79@gmail.com

³ Buchynska Iryna Volodymyrivna, Ph.D. in Geological Sciences, Senior Researcher at Department of Geology and Geochemistry of Solid Fuels, e-mail: libuchynska@ukr.net

⁴ Borysenko Oleksandr Lyudvikovych, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Acting Director, e-mail: zd@ukhin.org.ua

⁵ Mukina Natalia Volodymyrivna, Ph.D. in Technical Sciences, Head of the Technical Department of Production Management of the Coke-Chemical Plant, e-mail: Natalia.Mukina@arcelormittal.com

⁶ Pokrass Boris Yosypovych, Chairman of the Board, e-mail: cci.lubelia@gmail.com

⁷ Bidolenko Natalia Borysivna, Senior Researcher of CD, e-mail: yo@ukhin.org.ua

⁸ Grigor'eva Valeria Dmytrivna, Researcher of CD, e-mail: valegry72@gmail.com

The relevance of this research is determined by the growing demand for the production of high-quality blast furnace coke against the backdrop of limited opportunities for the supply of premium coking coal to Ukraine and the urgent need to establish a domestic resource base to ensure the stable operation of the metallurgical sector. Under these conditions, the study of domestic resources, in particular run-of-mine coal from the Lubel deposit, is of strategic importance for maintaining the stability and competitiveness of Ukraine's metallurgical industry.

The purpose of the study is to conduct a petrological and technological assessment of the potential of run-of-mine coal from the Lubel deposit in terms of its efficient and environmentally safe processing as a high-quality feedstock for coking.

This research is dedicated to evaluating the quality of coal from seam n7 of the "Lubelska" site No. 3 in the Lviv-Volyn Basin and its suitability for use in coal blends at the coking facilities of PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih" (AMKR). Coal from seam n7 was studied using a set of standardized methods in accordance with DSTU 7724:2015 and DSTU 3472:2015 classifications. Petrological characteristics, including maceral composition and vitrinite reflectance, as well as technological properties such as ash yield, sulfur content, volatile matter yield, plastometric parameters, grindability index, and coking pressure, were analyzed. A comprehensive methodology was applied, encompassing geological and petrographic analyses, maceral composition and vitrinite reflectance studies, indirect analysis, characterization of plastic-viscous behavior, and determination of the base index. Based on the results, coal from the Lubel deposit (section No. 3, seam No. 7) was classified according to the International Classification of Hard Coals (bituminous coal and anthracite) adopted by the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE).

The findings revealed a high vitrinite content (72 %) and an average random reflectance value of 1.21 %, corresponding to a medium rank of coalification and confirming the coking value of the coal. The run-of-mine coal has a low ash content (4.7 %) and sulfur content (0.91 %), which are favorable indicators for coking. The coal is easily grindable (HGI = 76) and exhibits moderate coking pressure (12.8–14.2 kPa), ensuring safe operation of coke ovens.

A comparison with other coal concentrates used in the AMKR blend demonstrated the competitive advantages of Lubel coal in terms of quality and economic feasibility. Its petrological and technological characteristics are comparable to coals from leading international basins (USA, Australia, Czech Republic), confirming the high industrial potential of the deposit.

Thus, coal from seam n₇ of the “Lubelska” site No. 3 can be considered a promising component of blends for the production of high-quality blast furnace coke at domestic enterprises.

Keywords: Lubel coal deposit, coal concentrates, petrographic characteristics, metamorphic stage, plastometric analysis, international coal classification system.

Corresponding author: V.V. Koval, e-mail: kovalen79@gmail.com

Manuscript received 2025/07/11

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-5-26-32

Спеціальність 161. УДК 662.74

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ХІМІЧНИХ ПРОДУКТІВ В ПРОЦЕСІ КОКСУВАННЯ ТРАМБОВАНИХ ШИХТ

Д.В. Мірошниченко¹

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

Л.П. Банніков², К.О. Дорошенко³

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)» (ДП «УХІН»), 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна

В.В. Савченко⁴

НТУ «ХПІ»

¹ Мірошниченко Денис Вікторович, докт. техн. наук, проф., зав. кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, e-mail: dyimir79@gmail.com.

² Банніков Леонід Петрович, докт. техн. наук, зав. хімічним відділом (ХВ), e-mail: ukhinbannikov@gmail.com.

³ Дорошенко Кристина Олександрівна, мол. наук. співр ХВ, e-mail: xo@ukhin.org.ua

⁴ Савченко Віталій Володимирович, аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, e-mail: korbinity@gmail.com

Стаття присвячена аналізу особливостей формування і виділення хімічних продуктів під час коксування трамбованих кам'яновугільних шихт. На основі узагальнених виробничих даних і відомих розрахункових залежностей розглянуто вплив складу кам'яновугільної шихти, її насипної щільності та параметрів трамбування, вологості, крупності вугільних зерен і температури підклепінного простору на вихід основних, тобто найзатребуваніших хімічних продуктів коксування: коксового газу, кам'яновугільної смоли та сирого бензолу. Показано, що трамбування дозволяє підвищити щільність шихти до 1,05–1,15 т/м³, зменшити вертикальну усадку коксованого вугільного завантаження та стабілізувати хід його карбонізації. Поряд з цим вихід смоли при коксуванні трамбованої шихти є нижчим, порівняно з більш поширеним в Україні процесом коксування шихти, завантаженої насипом. Особливу увагу приділено ролі елементного складу, а конкретніше – величинам атомарних співвідношень вмісту в вихідному вугіллі кисню та водню до вмісту вуглецю – в прогнозуванні швидкості первинного піролізу та співвідношення газових продуктів і таких, що в технологічному процесі конденсуються до рідкорухомого стану. Розглянуто емпіричні формули для оцінювання виходів основних продуктів коксування залежно від виходу летких речовин (V^{daf}), а також наведено практичні рекомендації щодо керування процесом з метою оптимізації співвідношення виходу й якості супутніх основних продуктів.

Зокрема, обґрунтовано висновок, що для подальшого розвитку способів прогнозування складу продуктів коксування потрібні розробки і впровадження у виробничу практику кінетичних моделей, котрі враховуватимуть реакційну здатність структурних елементів вугілля та продуктів коксування.

Ключові слова: коксування, кам'яновугільна шихта, трамбування, леткі речовини, коксовий газ, кам'яновугільна смола, сирий бензол, піроліз, атомарні співвідношення, щільність шихти.

Автор для листування Л.П.Банніков, e-mail: ukhinbannikov@gmail.com

Одним із напрямів інтенсифікації процесу коксування є застосування трамбованих шихт, що дає змогу підвищити насипну щільність і однорідність коксового пирога, компенсуючи нижчу спікливість газового вугілля та зменшуючи усадку під час карбонізації [1, 2]. У цьому контексті важливим є кількісно-якісний опис формування основних хімічних продуктів – коксового газу, смоли та сирого бензолу – з урахуванням як параметрів шихти (V^{daf} , вологість, гранулометрія, елементний склад), так і умов коксування (температурний режим, ступінь трамбування, щільність завантаження) [3-6].

Вплив виходу летких речовин шихти. Шихта для трамбування формується з урахуванням виходу летких речовин, із можливим введенням інертних компонентів – нафтового коксу, антрациту, іноді кам'яновугільного пеку [7, 8] (табл. 1).

Таблиця 1

Компоненти для коксування трамбованої шихти

Компоненти	Вихід летких речовин на сухий беззолний стан, V^{daf} , %
Вугілля	< 20
	20-28
	> 28
Добавки:	
Коксовий дріб'язок	< 2
Нафтовий кокс	10-14
Напівкокс	15-20
Кам'яновугільний або нафтовий пек	45-85
Біомаса, вуглецевмісні матеріали (гума, пластик тощо)	-

Збільшення вмісту летких на 1 % знижує насипну щільність шихти на 3,82 кг/м³, що обґрунтовує операцію трамбування як засіб компенсації втрати щільності [1]. Трамбування дозволяє підвищити щільність до 1,05–1,15 т/м³ і сформувати більш однорідну структуру пирога [2]. Це, своєю чергою, зменшує вертикальну усадку трамбованого пирога заввишки 4,8 м до 240–270 мм (5,0–5,5 %), що у 2,0–2,5 рази менше за насипне завантаження [9, 10].

У загальному випадку кількість хімічних продуктів корелює з виходом летких речовин (V^{daf}). Проте точні залежності є неоднозначними через різну термічну стійкість первинної смоли та розвиток вторинних реакцій [5, 11]. У середньому 60–70 % летких переходять у коксовий газ, а решта формує смолу (~10 %), сирий бензол (~4–5 %), аміак (~1 %) і воду (~20 %) [3]. Для інженерних розрахунків застосовують емпіричні формули (табл. 2–4).

Таблиця 2

Формули для визначення виходу коксового газу в залежності від виходу летких речовин

Вихід коксового газу	Примітки	Джерело
$3,93 \times (V^d)^{0,5} - 6,90$	для батарей із печами висотою 7,0 м	[12]
$2,8 \times (V^d)^{0,5}$	для батарей з печами висотою до 6,0 м включно	[12]
$2,99 \times (V^d)^{0,5}$	у разі коксування трамбованої шихти	[12]
$4,54 \times (V^d)^{0,5} - 7,9$	для окремої батареї	[13]
$4,27 \times (V^d)^{0,5} - 7,43$	для окремої батареї	[13]
$4,88 \times (V^d)^{0,5} - 8,45$	для окремої батареї	[13]
$0,559 V^d - 0,166 \times S^d$		[14]

Таблиця 3

Формули для визначення виходу смоли в залежності від виходу летких речовин

Вихід смоли, % від шихти	Примітки	Джерело
$-18,36+1,53 \times V^{\text{daf}} - 0,023 \times (V^{\text{daf}})^2$	формула С.Г. Аронова і Р.Л. Мішуловича	[13]
$7,69-0,52 \times V^{\text{d}}+0,0135 \times (V^{\text{d}})^2$	для батарей із печами висотою 7,0 м	[12]
$8,23-0,55 \times V^{\text{d}} + 0,0144 \times (V^{\text{d}})^2$	для батарей з печами висотою до 6,0 м включно	[12]
$8,086-0,49 \times V^{\text{d}} + 0,0128 \times (V^{\text{d}})^2$	у разі коксування трамбованої шихти	[12]
$7,33-0,49 \times V^{\text{d}}+0,0128 \times (V^{\text{d}})^2$	для окремої батареї	[13]
$0,135 \times V^{\text{d}} - 0,01 \times S^{\text{d}}$		[14]
$-1,4+0,184 \times V^{\text{daf}}$		[15]

Таблиця 4

Формули для визначення виходу сирого бензолу в залежності від виходу летких речовин

Вихід сирого бензолу	Примітки	Джерело
$-1,61+0,144 \times V^{\text{daf}} - 0,0016(V^{\text{daf}})^2$	формула С.Г. Аронова і Р.Л. Мішуловича	[13]
$-1,74+0,138 \times V^{\text{d}}-0,0016 \times (V^{\text{d}})^2$	для батарей із печами висотою 7,0 м	[12]
$2,91-0,199 \times V^{\text{d}}+0,0044 \times (V^{\text{d}})^2$	для батарей з печами висотою до 6,0 м включно	[12]
$3,1-0,203 \times V^{\text{d}}+0,0044 \times (V^{\text{d}})^2$	у разі коксування трамбованої шихти	[12]
$3,58-0,22 \times V^{\text{d}} + 0,00505 \times (V^{\text{d}})^2$	для окремої батареї	[13]
$2,54-0,155 \times V^{\text{d}} + 0,0036 \times (V^{\text{d}})^2$	для окремої батареї	[13]
$3,83-0,23 \times V^{\text{d}} + 0,0054 \times (V^{\text{d}})^2$	для окремої батареї	[13]
$0,0443 \times V^{\text{d}} - 0,0132 \times S^{\text{d}}$		[14]

Усі наведені формули показують, що збільшення виходу летких речовин із вугілля призводить до підвищення виходу основних хімічних продуктів коксування. Усі прямі залежності між виходом певного хімічного продукту коксування та вмістом летких речовин (V^{daf}) мають подібний нахил (градієнт), але різняться за положенням на осі ординат, що свідчить про відмінність у початкових значеннях виходу.

Вплив елементного складу шихти. Важливим підходом до узагальнення є використання атомних співвідношень О/С та Н/С як регресійних параметрів, що відображають реакційну здатність, кількість активних центрів і напрямок перетворень під час піролізу [4]. Підвищений вміст кисню у вихідному вугіллі зменшує частку первинної смоли у високотемпературному конденсаті, оскільки при нагріванні мономерні структури смоли руйнуються, а периферійні функціональні групи значною мірою зберігаються; в технологічному процесі саме зі смоли видаляються О і Н [5]. Частина моделей розрахунку виходу коксового газу (V , $\text{нм}^3/\text{т}$) прямо враховує вміст кисню у вугіллі [6]:

$$V, \text{нм}^3/\text{т} = 16,494 \times V - 0,7408 \times V \times O, \quad (1)$$

де О – вміст кисню у вугіллі, %.

На цій основі можливе прогнозування виходів хімічних продуктів коксування за елементним складом [16]:

$$\text{Смола} = -1,3 \times C(\%) - 1,1 \times H(\%) + 0,5 \times O(\%) + 0,8 \times N(\%) + 0,4 \times S(\%) + 328 \times H/C - 353,3 \times O/C - 55,7; \quad (2)$$

$$\text{Бензол} = 0,2 \times H(\%) + 0,1 \times N(\%) + 31,4 \times H/C + 12,2 \times O/C - 11,3; \quad (3)$$

$$\text{Газ} = 4,3 \times C(\%) + 18,8 \times H(\%) + 2,8 \times O(\%) + 4,3 \times N(\%) - 26,3 \times H/C + 339,9 \times O/C - 319,46. \quad (4)$$

Вплив щільності шихти. Трамбування ущільнює вугільну шихту, збільшуючи густину вугільного пирога, що має суттєвий вплив на процес коксування та вихід хімічних продуктів.

Підвищення щільності трамбування до 1,05–1,15 $\text{т}/\text{м}^3$ створює більш однорідний коксовий піріг і зменшує вертикальну усадку до 5,0–5,5 % (240–270 мм для $h = 4,8$ м), що істотно менше, ніж при застосування завантаження насипом [2, 9, 10].

За матеріалами [17] встановлено графічний зв'язок вмісту в кам'яновугільній смоли речовин, нерозчинних у хіноліні, з насипною щільністю шихти (рис. 1), який можна використовувати як індикатор піролізованості смоли.

За результатами М. Г. Скліяра та подальших досліджень [18] встановлено, що збільшення часу утримання летких компонентів всередині зерен вугілля активізує вторинні реакції з участю водню, що, в свою чергу, впливає на склад продуктів коксування.

Аналізуючи отримані дані щодо характеристик і густини коксових газів, можна визначити тенденції зміни їх об'ємів при різному ступені подрібнення шихти. Зокрема, зменшення розміру частинок вугілля призво-

дить до певного зниження масового виходу газу та корекції його складу. Це пояснюється тим, що дрібніша фракція забезпечує довший контакт летких речовин із твердою фазою, що сприяє розвитку вторинних реакцій за участю водню. У табл. 5 наведено результати експериментів, які демонструють вплив крупності помелу вугілля на об'єм коксового газу, а також на його густину та компонентний склад.

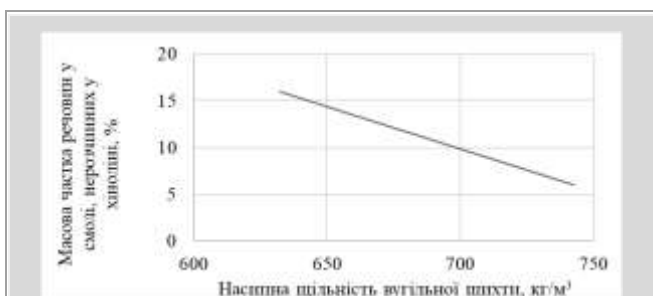


Рис. 1 Залежність ключового показника піролізованості смоли (вмісту речовин, що нерозчинні у хіноліні) від насипної щільності шихти

Зміна температури підсклепінного простору впливає на ступінь піролізованості отримуваної кам'яновугільної смоли і, відповідно, на її якість (рис. 2). Оптимізація цього параметра дозволяє керувати процесами вторинного піролізу і якістю хімічних продуктів – насамперед смоли кам'яновугільної та сирого бензолу [17].

З підвищенням вмісту вологи у вугіллі ступінь піролізованості смоли знижується (табл. 6).

Вихід коксового газу зростає зі збільшенням вологості шихти, оскільки вода, що випаровується в зоні пластифікації, вступає у високотемпературні реакції з вуглецем, збільшуючи об'єм газової фази. За

вологості 10,13 % концентрація водню (H_2) у газі досягає 52,47 %, тоді як при 1,8 % вона знижується до 51,47 %. Це підтверджує участь додаткової води в реакціях газоутворення та зростання частки водню [20]. Зі зниженням вологості вугілля зменшується вміст вуглеводневих компонентів (C_xH_y) у газі. За вологості 10,13 % їх концентрація становить 3,08 %, а при 1,8 % – лише 2,73 %. Це пояснюється впливом пари на руйнування радикалів або її конверсією у водень за високих температур [19].

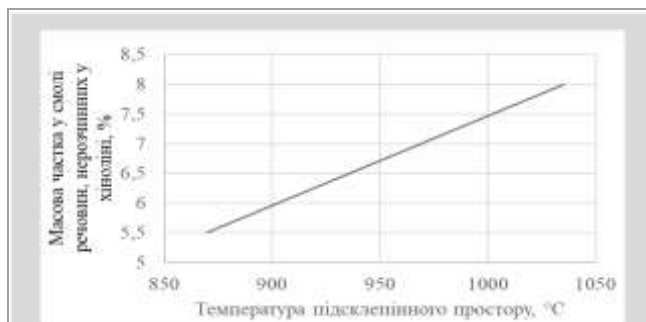


Рис. 2 Залежність якості смоли від температури підсклепінного простору

Концентрації CO та CO_2 майже не залежать від вологості шихти, що свідчить про вплив інших факторів – ступеню вуглефікації, температури та часу піролізу [19]. За даними [9, 21], підвищення вологості з 5,7 до 10,7 % збільшує вміст CO_2 з 3,9 до 4,2 %, CO – з 6,5 до 6,7 %, H_2 – з 49,3 до 52,3 %, а концентрація CH_4 знижується з 27,4 до 24 %. За вологості 8–11 % вихід газу зростає, після чого стабілізується або зменшується [9, 21]. Вологість також впливає на аміак: при зростанні від 2 до 12 % його концентрація падає з 7,7 до 5,2 г/м³, тоді як вміст H_2S у газі збільшується [9, 21].

Таблиця 5

Оцінка впливу крупності вугільного зерна на об'ємний вихід газу

Ступінь подрібнення вугільної шихти, мм	Вихід коксового газу, мас. частка, %	Густина газу, кг/м³	Питомий вихід газу, м³/т сухої шихти
0-13	12,75	0,4303	296
0-6	12,85	0,4070	316
0-3	12,05	0,3838	314

Таблиця 6

Вплив вологості вугілля на елементний склад [19]

Вміст вологи у вугіллі, %	Елементний склад вторинної смоли, %				
	C	H	O	N	S
0,4	93	3,6	2,3	1,1	0,7
7,8	89,2	4,4	1,7	2	1,2
10,0	84,6	4,4	5,5	1,7	1,5
15,0	87,5	4,1	5,2	1,6	0,9

Порівняння виходу хімічних продуктів коксування з трамбованої та насипної шихти.

Вихід кам'яновугільної смоли з ущільненої та насипної шихти визначали в апараті Енкнера (навантаження 1,2 кг) при температурі підсклепінного простору 850 °С [22]. Дослідження проводили в однакових умовах, враховуючи основні характеристики шихти, зокрема вміст легких речовин (рис. 3).

Вплив поступового ущільнення вугільної шихти, що коксується, на динаміку зміни виходу хімічних продуктів вивчався в лабораторних умовах Кузніченком В.М. [10], табл. 7.

Результати дослідження показують, що зі зростанням насипної густини вугільної шихти відбувається підвищення виходу коксового газу та зниження виходу смоли після досягнення насипної густини на рівні 950 кг/м³. Також спостерігається певне зменшення виходу пірогенетичної води. Вихід інших продуктів коксування істотно не залежить від насипної густини завантаження.

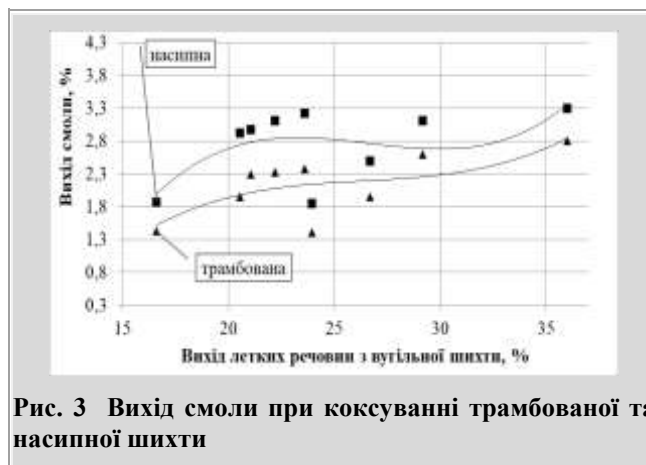


Рис. 3 Вихід смоли при коксуванні трамбованої та насипної шихти

Таблиця 7

Вихід продуктів коксування за різної насипної густини шихти, що коксується

Насипна щільність шихти, кг/м ³	Вихід продуктів коксування, %					
	Смола	Коксовий газ	Сирий бензол	NH ₃	CO ₂ +H ₂ S	Пірогенетична волога
750	5,59	11,7	0,84	0,14	0,8	4,41
800	5,53	11,7	0,86	0,16	0,78	4,35
850	5,55	11,8	0,87	0,15	0,81	4,23
900	5,6	11,8	0,83	0,16	0,79	4,2
950	5,24	12,0	0,9	0,14	0,77	4,28
1000	5,15	11,9	0,84	0,17	0,8	4,3
1050	4,98	12,0	0,88	0,15	0,83	4,24

Висновки

Трамбовані шихти формуються з ущільненої вугільної маси з високим вмістом легких речовин, підвищеною вологістю та дрібною зернистістю, що зменшує вертикальну усадку та змінює умови термічного розкладу. Підвищення щільності знижує газопроникність, збільшує тиск і активізує реакції деполімеризації, що сприяє утворенню легких продуктів.

Зростання V^{daf} коксованого вугілля підвищує вихід основних хімічних продуктів коксування (газ, смола, сирий бензол), але вплив залежить від метаморфізму, температури та елементного складу. Склад отриманого коксового газу (CH₄, CO, CO₂, NH₃, H₂S) визначається структурою органічної маси та формами зв'язку гетероатомів.

Підвищення вологості коксованого вугілля знижує температуру підсклепового простору, підвищує газоутворення та зменшує піролізованість смоли.

Підвищення щільності вугільного завантаження і зменшення крупності вугільних зерен знижує утворення в отримуваній смолі хінолін-нерозчинних речовин і змінює склад побічних продуктів, покращуючи якість смоли.

Для точного прогнозування значень виходу хімічних продуктів коксування необхідно враховувати виробничі дані та зміну ключових параметрів процесу. Для подальшого розвитку способів прогнозування складу хімічних продуктів коксування потрібні кінетичні моделі, що враховують реакційну здатність структурних елементів.

Бібліографічний список

1. Rejda M. Stamp-Charged Coke-Making Technology – An Empirical Model for Prediction of Coal Charge Density for Stamp Charging Coke Oven Batteries / M. Rejda, G. Galko,

- M. Sajdak, A. Wieczorek** // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – P. 9440. <https://doi.org/10.3390/en15249440>.
- 2. Kuyumcu H.Z.** Stamped and pressed coal cakes for carbonisation in by-product and heat-recovery coke ovens / **H.Z. Kuyumcu, S. Sander** // *Fuel*. – 2014. – Vol. 121. – P. 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.024>.
- 3. Chmielniak K.** Koksownictwo / **K. Chmielniak**. – Katowice: Slask, 1986. – 549 p.
- 4. Pan S.** Depolymerization Model for Coal Devolatilization: Bridges and Side Chains as the Reaction Centers / **S. Pan, S. Hui, L. Liang** // *Energy & Fuels*. – 2015. – Vol. 29(4). – P. 2162–2176. <https://doi.org/10.1021/ef502646r>.
- 5. Niksa S.** A reaction mechanism for tar decomposition at moderate temperatures with any coal type / **S. Niksa** // *Fuel*. – 2017. – Vol. 193. – P. 467–476. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.069>.
- 6. Nomura S.** The yield of coke oven gas from hard and semi-soft coking coals / **S. Nomura, T. Nakagawa** // *International Journal of Coal Geology*. – 2016. – Vol. 168. – P. 179–185. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.10.004>.
- 7. Madias J.** A Review on Stamped Charging of Coals / **J. Madias, M. de Córdova** // *Ironmaking Conference Proceeding*. – 2011. – Vol. 70. – P. 142–153.
- 8. Kuyumcu H.Z.** Analyses of the coal densification behavior and the coal cake stability within the stamped charge coke making operation / **H.Z. Kuyumcu, F. Abel, J. Rosenkranz** // *Proceedings of the Conference in Minerals Engineering 2011 (Luleå, Sweden, 8–9 February 2011)* / ed. by J. Alatalo. – Luleå: Luleå University of Technology, 2011. – P. 123–137.
- 9. Кузнiченко В.М.** Тиск розпирання вугiлля та шихт в процесi коксування : монографiя / **В.М. Кузнiченко, I.В. Шулъга, О.В. Ситник**. – Харкiв: Планета-Прiнт, 2021. – 210 с.
- 10. Кузнiченко В.М.** Особливостi термохiмiчних перетворень при коксуваннi трамбованого вугiльного завантаження / **В.М. Кузнiченко** // *Вуглехiмiчний журнал*. – 2010. – № 3–4. – С. 66–72.
- 11. Solomon P.R.** Coal pyrolysis: experiments, kinetic rates and mechanisms / **P.R. Solomon, M.A. Serio, E.M. Suuberg** // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 1992. – Vol. 18(2). – P. 133–220. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(92\)90001-Q](https://doi.org/10.1016/0360-1285(92)90001-Q).
- 12. Методичнi рекомендацiї щодо планування обсягiв виробництва основних видiв продукцiї на коксохiмiчних** підприємствах України. – Днiпропетровськ – Харкiв: УНПА «Укркокс», 2002. – 102 с.
- 13. Мiрошниченко Д.В.** Вплив елементного та петрографiчного складiв вугiлля i шихт на вихiд основних продуктiв коксування / **Д.В. Мiрошниченко, М.Б. Головка**. – Харкiв : Планета-Прiнт, 2020. – 115 с.
- 14. Гребенюк А.Ф.** Розрахунки процесiв коксового виробництва: посiбник iз проектування / **А.Ф. Гребенюк, О.І. Збиковський**. – Донецьк: Норд-Прес, 2008. – 322 с.
- 15. Chao Wei.** Method for predicting yield of coal tar: pat. CN 102175710 B China / **Wei Chao, Su Zhan, Li Dongtao, Ma Zejun, Zhang Xiaoming**. – Filed 25.02.2011; issued 01.08.2012.
- 16. Shiraiishi K.** Estimation of yield of product through carbonization of coal: pat. JPH06207933 A Japan / **K. Shiraiishi**. – Filed 11.01.1993; published 26.07.1994.
- 17. Wombles R.H.** The Effect of Binder Pitch Quinoline Insolubles Content on Aluminum Anode Physical Properties / **R.H. Wombles, B. Sadler** // *Coke Oven Managers' Year Book*. – 2013. – Vol. 119. – P. 119–146.
- 18. Vega M.F.** Influence of the Heating Rate on the Quality of Metallurgical Coke / **M.F. Vega, E. Díaz-Faes, C. Barriocanal** // *ACS Omega*. – 2021. – Vol. 6. – P. 34615–34623.
- 19. Krebs V.** Effects of coal moisture content on carbon deposition in coke ovens / **V. Krebs, G. Furdin, J.-F. Marché, D. Dumay** // *Fuel*. – 1996. – Vol. 75(8). – P. 979–986. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(96\)00066-3](https://doi.org/10.1016/0016-2361(96)00066-3).
- 20. Fang H.-m.** Effect of coal moisture content on coke's quality and yields of products during coal carbonization / **H.-m. Fang, J. Han, H.-j. Zhang, B. Zhao, L.-b. Qin** // *Journal of Central South University*. – 2020. – Vol. 26(12). – P. 3225–3237. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4567-7>.
- 21. Пастернак О.О.** Причини отримання кам'яновугiльної смоли рiзної якостi у цехах уловлювання ПАТ «АКХЗ» / **О.О. Пастернак, Г. Г. Клешня, О.Ю. Лаєрова, Є.Т. Ковалев, Л.П. Банников** // *Вуглехiмiчний журнал*. – 2013. – № 5. – С. 71–76.
- 22. Tiwari H.P.** A comparative study of by-products yields from coke making processes in a Jenkner apparatus / **H.P. Tiwari, P.K. Banerjee, R. Sharma, S.K. Haldar, P.C. Joshi** // *Coke and Chemistry*. – 2014. – No. 5. – P. 192–198. <https://doi.org/10.3103/S1068364X14050073>.

Рукопис надiйшов до редакцiї 12.08.2025

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-5-26-32

Specialty 161. U.D.C. 662.74

FEATURES OF CHEMICAL PRODUCT FORMATION DURING THE COKING OF STAMP-CHARGED COAL BLENDS

© D.V. Miroshnychenko¹

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” (NTU KhPI), 61002, Kharkiv, Kyrpychova St., 2, Ukraine

L.P. Bannikov², K.O. Doroshenko³

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



V.V. Savchenko⁴

NTU “KhPI”

¹ Miroshnychenko Denis Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Prof., Head of the Department of Oil, Gas and Solid Fuel Processing Technology (DOGSFPT), e-mail: dvmir79@gmail.com² Bannikov Leonid Petrovych, Doctor of Technical Sciences, Head of Chemical Department (ChD), e-mail: ukhinbannikov@gmail.com³ Doroshenko Khrystyna Oleksandrivna, Junior Researcher of ChD, e-mail: xo@ukhin.org.ua⁴ Savchenko Vitaliy Volodymyrovych, Postgraduate Student of the DOGSFPT, e-mail: korbinity@gmail.com

The article is devoted to the analysis of the peculiarities of the formation and release of chemical products during the coking of stamped coal charges. Based on generalised production data and known calculated dependencies, the influence of the composition of coal charge, its bulk density and compaction parameters, moisture content, coal grain size and temperature of the under-roof space on the yield of the main, i.e. the most popular chemical products of coking: coke oven gas, coal tar and crude benzene. It is shown that stamping allows increasing the density of the charge to 1.05–1.15 t/m³, reducing the vertical shrinkage of the coked coal charge and stabilising its carbonisation process. At the same time, the tar yield during coking of stamped charge is lower compared to the more common process of coking bulk charge in Ukraine. Particular attention is paid to the role of elemental composition, and more specifically, to the values of atomic ratios of oxygen and hydrogen content in the initial coal to carbon content in predicting the rate of primary pyrolysis and the ratio of gas products and those that condense to a liquid state in the technological process. Empirical formulas for estimating the yields of main coking products depending on the yield of volatile substances (V^{daf}) are considered, and practical recommendations for process control are given to optimise the ratio of yield and quality of related main products. In particular, the conclusion is justified that for the further development of methods for predicting the composition of coking products, it is necessary to develop and implement kinetic models in production practice that will take into account the reactivity of the structural elements of coal and coking products.

Keywords: coking, coal charge, stamping, volatile matter, coke oven gas, coal tar, crude benzene, pyrolysis, atomic ratios, charge density.

Corresponding author: L.P. Bannikov, e-mail: korbinity@gmail.com

Manuscript received 2025/08/12

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-5-32-41

Спеціальність 161. УДК 662.741.3

ВЛАСТИВОСТІ КОКСУ З ВУГІЛЬНИХ ШИХТ З РІЗНИМИ СУПУТНИМИ ПРОДУКТАМИ ПЕРЕРОБКИ ВУГІЛЛЯ© О.Л. Борисенко¹, І.В. Шульга², Ю.В. Телешев³

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)», 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна

Є.І. Котляров⁴

Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України (НДЦ ІПР), 61166, м. Харків, пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Україна

¹ Борисенко Олександр Людвинович, канд. техн. наук, с.н.с., в.о. директора, e-mail: zd@ukhin.org.ua² Шульга Ігор Володимирович, канд. техн. наук, доц., с.н.с., зав. коксового відділу, e-mail: ko@ukhin.org.ua³ Телешев Юрій Володимирович, канд. техн. наук, e-mail: 196112juv@gmail.com⁴ Котляров Євген Іванович, канд. економ. наук, доц., зав. сектору енергетичної безпеки та енергозбереження, e-mail: ekotlarov@i.ua

Показано, що сучасні умови роботи коксохімічних підприємств України характеризуються значними складнощами у вуглезабезпеченні, спричиненими як тимчасовою втратою більшості потужностей з видобутку коксівного вугілля, так і логістичними складнощами постачання імпортного вугілля. Тому актуальними є дослідження, виконані на одному з найбільших коксохімічних підприємств України, щодо коксування шихт з додаванням коксового дрібняку, кам'яновугільної смоли та накопичених відходів збагачення коксівного вугілля. Встановлена можливість отримання коксу прийнятної якості за додавання зазначених добавок до шихти марочного складу (%): Г – 20; Ж – 50; К – 30. Додавання до шихти до 4 % відходів збагачення практично не змінює міцнісні показники отриманого коксу, але збільшує його зольність в середньому на 0,4 % на кожен відсоток внесеної добавки. За внесення до 3 % кам'яновугільної смоли внаслідок переожирнення шихти показник M_{25} знижується в середньому на 0,8 %, а M_{10} зростає на 0,3 %. За введення в шихту до 3 % коксового дрібняку показник M_{25} знижується в середньому на 2,5 %, а M_{10} зростає на 1,8 % на кожний відсоток внесеної добавки. При цьому важливе якнайтонше подрібнення добавки. За сумісного використання в шихті дрібняку та смоли в співвідношенні 1:1 в кількості до 3 % кожної добавки показник M_{25} знижується в середньому на 1,7 %, а M_{10} зростає на 1,2 % на кожен відсоток добавки. Таке зниження негативного впливу пояснюється зменшенням невідповідності між кількістю утворених за коксування рідкокорухливих продуктів та величиною змочуваної ними поверхні. Отримані результати підтверджують необхідність пошуку нових шляхів використання досліджених супутніх продуктів як у традиційних, так і принципово нових сферах застосування.

Ключові слова: коксохімічне виробництво, коксовий дрібняк, кам'яновугільна смола, відходи вуглезабагачення, вугільна шихта, коксування, якість коксу.

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

Сучасні умови вуглепостачання коксохімічних підприємств України характеризуються недостатньою кількістю та некомплектністю постачань компонентів вугільних шихт для коксування [1]. Головними причинами цього є тимчасова втрата контролю над більшістю потужностей з видобутку коксівного вугілля, а також логістичні складності з постачанням вугілля по імпорту. Це робить актуальними результати, отримані на одному з найкрупніших коксохімічних підприємств України з коксування шихти з додаванням супутніх продуктів, отримуваних за підготовки та коксування вугілля.

Метою дослідження є обґрунтування можливості отримання коксу прийнятної якості з вугільних шихт із додаванням супутніх продуктів підготовки вугілля та його коксування.

Завданням, що вирішується на даному етапі дослідження, є аналіз впливу кількості внесених до шихти добавок різної природи на показники якості отриманого коксу і визначення на підставі цього припустимих кількостей добавок різних типів, які додаються до шихти.

В якості матеріалів, що додаються до вугільної шихти, розглядали низку супутніх продуктів:

- накопичені відходи вуглезабагачення;
- коксовий дрібняк, обсяги використання якого для агломерації останнім часом суттєво зменшились;
- кам'яновугільна смола, складності з реалізацією якої періодично виникають на підприємствах підгалузі.

Склад базової шихти для лабораторних дослідних коксувань обирали виходячи з того, що в промислових умовах така шихта може бути реалізована за недостатніх та некомплектних поставок вугілля. Газове вугілля було представлене вугільними концентратами Донбасу А та В, а також польським вугіллям С в співвідношенні 1:1:2. Також використовували жирне вугілля D. Окрім того, в шихті було кокове вугілля E.

Властивості компонентів базової шихти, відходів збагачення та коксового дрібняку подані в табл. 1. З неї видно, що використане в базовій шихті вугілля в цілому є типовим для своїх марок. За ДСТУ 3472:2015. вугілля А, В та С відноситься до марки Г, вугілля D – до марки Ж, вугілля E – до марки К. Серед особливостей їх технологічних властивостей слід перш за все зазначити підвищену зольність всіх компонентів. Звертає також на себе увагу підвищена сірчистість концентрату D, що зумовлено специфічними властивостями цього середньокорбонового жирного вугілля, та понижені сірчистість та спіклівість маловідновленого вугілля E.

Таблиця 1

Властивості компонентів вугільної шихти та добавок до неї

Компонент	Марка	Технічний аналіз, %					Пластометрія, мм		Співлива здатність RI	Інтервал пластичності та в'язкість пластичної маси за Гізелером				
		W^a	A^d	S_t^d	V^d	V^{daf}	X	Y		t_1	t_2	t_3	Δt	°C/хв
A+B (1:1)	Г	2,8	8,5	1,74	33,8	37,1	46	10	56	353	398	422	69	700
С	Г	2,4	8,6	0,77	34,5	37,7	41	11	58	356	393	422	66	3240
D	Ж	0,8	9,7	2,55	29,5	32,7	-4	28	88	330	415	445	115	>10000
E	К	1,4	9,7	0,87	25,7	28,8	21	12	53	378	408	438	60	660
Відходи збагачення	-	2,2	39,8	1,53	23,1	38,3	-	-	17	-	-	-	-	-
Коксовий дрібняк	-	1,0	15,1	1,79	2,1	2,4	-	-	-	-	-	-	-	-

Відходи збагачення характеризуються високою (майже 40 %) зольністю, що зумовлює завищений вихід легких речовин з їх сухої неззеленої маси. Слід зазначити їх помітну спікливу здатність, що дозволяє, на відміну від коксового дрібняку, розглядати їх не як інертний матеріал, а як органічно-мінеральну добавку,

здатну до термохімічних перетворень та взаємодії з іншими компонентами шихти за коксування [2].

Коксовий дрібняк відповідає вимогам технічних умов ТУ У 322-00190443-011:2011 для марки КМ-2. Властивості кам'яновугільної смоли наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Властивості кам'яновугільної смоли

Показник	Одиниця виміру	Числове значення
Сірчистість загальна сухої маси, S_t^d	%	1,12
Масова частка α -фракції (речовин, нерозчинних в толуолі)	%	9,2
Щільність сухої маси, ρ^d	кг/м ³	1208
Вихід пеку	%	61
Зольність зневодненої маси, A^d	%	0,2
Вихід легких речовин із сухої неззеленої (горючої) маси, V^{daf}	%	72,5

Використання в складі шихти вугілля С та Е зі зниженою сірчистістю зумовило і невисоку сірчистість отримуваної смоли. За комплексом властивостей ця смола відповідає марці В (другий сорт) згідно з ТУ У 19.1-00190443-100:2016.

За визначення складу базової шихти виходили перш за все з умови стабільного постачання відповідних вугільних концентратів. Цей склад був наступним (%): Г – 20; Ж – 50; К – 30. Як бачимо, такий склад характеризується повною відсутністю в шихті високометаморфозованого вугілля марки ПС, що зумовлює дещо надмірну

спікливість шихти (товщина пластичного шару $y=17$ мм), тобто кількість утворюваних шихтою за термічної деструкції рідкорухливих продуктів більша, ніж потрібно для змочування за спікання реакційної поверхні [3].

Дослідні шихти готували з базової, додаючи до неї відповідні кількості відходів збагачення, коксового дрібняку та кам'яновугільної смоли. При цьому дольову частку базової шихти в кожній конкретній дослідній шихті визначали за різницею між 100 % та сумарним вмістом добавок. Рівні та інтервали варіювання факторів у % наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Рівні та інтервали варіювання факторів

Фактор та його позначення	Рівні варіювання показників		
	Нижній $X_i=-1$	Середній $X_i=0$	Верхній $X_i=1$
Масова частка відходів збагачення X_1	0	5	10
Масова частка коксового дрібняку X_2	0	1,5	3
Масова частка кам'яновугільної смоли X_3	0	1,5	3

Для складання матриці планування експериментів був використаний план Бокса-Бенкіна на кубі [4]. Його переваги:

– приблизно однакова кількість дослідів на кожному з трьох (включаючи нульовий) рівнів варіювання факторів;

– менша кількість експериментів у порівнянні з іншими планами другого порядку (наприклад, ротатабельним центральним композиційним планом).

План Бокса-Бенкіна передбачає проведення 13 експериментів. Цей план був доповнений ще одним, 14-м дослідом, в якому коксували базову шихту без домішок. Матриця планування та відповідні їй склади дослідних шихт наведені в табл. 4. Експерименти проводили двома рандомізованими серіями, що дозволило оцінити похибку відтворюваності експериментів.

Дослідження виконували в лабораторних умовах ДП «УХІН» з використанням дослідної електричної печі з масою разового завантаження 5 кг [5]. Для приготування кожного варіанту дослідної шихти змішували потрібні кількості всіх компонентів базової шихти та добавок – відходів збагачення і коксового дрібняку. Коксовий дрібняк попередньо подрібнювали до 100 % вмісту класу менше 3 мм. Отриману шихту ретельно усереднювали пересипанням на конус не менше трьох разів. Після цього до суміші вносили потрібну кількість кам'яновугільної смоли, відібраної з підігрітої та ретельно перемішаної проби; знову усереднювали шихту пересипанням на конус до візуального зникнення крапель смоли, але не менше трьох перемішувань.

Таблиця 4

Матриця планування експериментів та відповідні їй склади дослідних шихт

Варіант	Кодовані значення факторів			Склад дослідної шихти, %							
	X ₁	X ₂	X ₃	A	B	C	D	E	відходи збагачення	дрібняк	смола
1	0	-	+	4,6	4,6	9,2	46,0	27,6	5,0	-	3,0
2	0	-	-	4,8	4,8	9,4	47,5	28,5	5,0	-	-
3	0	+	-	4,6	4,6	9,2	46,0	27,6	5,0	3,0	-
4	0	+	+	4,5	4,5	8,8	44,5	26,7	5,0	3,0	3,0
5	0	0	0	4,6	4,6	9,2	46,0	27,6	5,0	1,5	1,5
6	-	0	-	4,9	4,9	9,9	49,3	29,5	-	1,5	-
7	-	0	+	4,8	4,8	9,5	47,8	28,5	-	1,5	3,0
8	-	-	0	4,9	4,9	9,9	49,3	29,5	-	-	1,5
9	-	+	0	4,8	4,8	9,5	47,8	28,6	-	3,0	1,5
10	+	0	-	4,4	4,4	8,9	44,3	26,5	10,0	1,5	-
11	+	0	+	4,3	4,3	8,5	42,8	25,6	10,0	1,5	3,0
12	+	-	0	4,4	4,4	8,9	44,3	26,5	10,0	-	-
13	+	+	0	4,3	4,3	8,5	42,8	25,6	10,0	3,0	1,5
14	-	-	-	5,0	5,0	10,0	50,0	30,0	-	-	-

Властивості отриманих дослідних шихт наведені в табл. 5. Як бачимо, додавання до базової шихти відходів збагачення збільшує зольність дослідної шихти; решта показників технічного аналізу лишаються практично незмінними. Незначно змінюються і пластично-в'язкі властивості, що зумовлено зазначеною вище наявністю надлишкової спікливої в базовій шихті, а також помітною спікливою здатністю самих відходів збагачення. Аналогічним чином змінюються властивості дослідних шихт і за введення до їх складу коксового дрібняку. В'язкість пластичної маси помітно змінюється

лише за одночасного введення в дослідну шихту і відходів збагачення, і коксового дрібняку.

За введення кам'яновугільної смоли в дослідній шихті знижуються зольність та сірчистість, зростають вихід легких речовин та товщина пластичного шару. Помітно зростає і показник, що характеризує в'язкість пластичної маси.

Дослідні шихти коксували зі швидкістю 3 °C/хв до кінцевої температури за віссю завантаження 950 °C. Період коксування складав 6 годин. Отриманий кокс гасили сухим безконтактним способом шляхом теплообміну з оточуючим повітрям крізь стінку реторти.

Таблиця 5

Властивості отриманих дослідних шихт

Варіант	Технічний аналіз, %				Пластометрія, мм		Співвідношення здатності RI	Інтервал пластичності в °С та в'язкість пластичної маси за Гізелером				
	A^d	S_t^d	V^d	V^{daf}	X	Y		t_1	t_2	t_3	Δt	°С/хв
1	10,7	1,74	30,5	33,7	28	18	66	342	393	438	96	7290
2	10,9	1,77	28,5	32,6	28	15	73	340	398	436	96	6170
3	11,1	1,76	28,0	31,7	23	16	71	350	403	438	88	5760
4	10,9	1,73	29,5	33,3	28	15	72	348	402	438	90	4680
5	10,7	1,74	29,1	32,7	26	17	66	340	398	436	96	3600
6	9,6	1,78	29,8	32,9	30	15	77	341	397	433	92	4990
7	9,4	1,76	29,6	32,7	27	16	74	326	402	438	112	4760
8	9,3	1,77	29,4	32,5	26	18	73	327	398	432	105	5930
9	9,5	1,77	29,0	32,0	24	17	67	325	396	430	105	6760
10	12,8	1,75	28,3	32,4	24	16	75	348	404	439	91	5040
11	12,5	1,72	28,9	33,0	26	17	71	325	393	430	105	5600
12	12,2	1,74	28,8	33,4	31	16	73	340	397	434	94	4880
13	12,6	1,73	28,4	32,5	24	17	74	323	400	438	115	2960
14	9,4	1,78	28,8	32,4	24	17	81	340	402	437	97	4680

Таблиця 6

Механічні властивості та технічний аналіз дослідного коксу

Варіант	Механічні властивості				Технічний аналіз, %		
	B_k	K_{50}	Π_{25}	C_{10}	A^d	S_t^d	V^{daf}
1	75,6	92,4	88,0	8,1	14,2	1,54	1,0
2	76,6	99,5	90,8	7,3	14,7	1,53	0,8
3	77,9	97,9	77,7	13,1	15,3	1,52	1,4
4	76,6	98,4	83,2	11,3	14,4	1,43	1,0
5	76,7	93,3	85,7	10,5	14,5	1,48	1,3
6	76,0	92,3	82,4	9,8	13,0	1,49	1,0
7	75,8	95,3	84,9	9,8	12,4	1,43	1,0
8	75,7	95,7	87,8	8,3	11,7	1,49	1,2
9	76,6	99,4	79,2	12,3	13,6	1,54	0,9
10	78,0	93,7	85,3	9,9	17,0	1,59	1,3
11	76,6	92,8	86,3	9,6	16,6	1,52	0,9
12	76,9	97,0	88,6	7,8	16,6	1,57	1,2
13	77,6	98,9	80,5	12,6	16,3	1,54	1,5
14	76,8	92,5	91,7	7,3	12,2	1,52	0,9

Після цього визначали показники технічного аналізу, фізико-хімічні та механічні властивості коксу. Останні характеризували за допомогою наступних величин у %: B_k – вихід валового коксу від шихти (аналогічний показник використовується і за промислових умов); K_{50} – вміст кусків розмірами більше 50 мм в коксі (аналогічним показником за промислових умов є вихід доменного коксу від валового); Π_{25} – опір коксу

подрібнювальним зусиллям – вихід класу більше 25 мм після випробування в спеціальному барабані (промисловий аналог – показник M_{25}); C_{10} – стиранистість коксу – вихід класу менше 10 мм після випробування в спеціальному барабані (промисловий аналог – показник M_{10}).

Механічні властивості та показники технічного аналізу дослідного коксу надані в табл. 6. З них видно, що додавання до шихти коксового дрібняку або

кам'яновугільної смоли помітно погіршує міцність коксу. Менш сильно на цей показник впливає додавання відходів вуглезбагачення. Зольність коксу суттєво збільшується за додавання до шихти коксового дрібняку та особливо – відходів вуглезбагачення. Низький вихід летких речовин з отриманого коксу свідчить про його високу готовність та, отже, стабільні умови коксування та відтворність виконаних експериментів.

В табл. 7 показані дані щодо фізико-хімічних властивостей коксу. Вони дозволяють зробити висновок, що введення до складу дослідної шихти відходів вуглезбагачення та коксового дрібняку, які в порівнянні з ву-

гільям мають більшу дійсну щільність, що дозволяє збільшити цей показник і в отриманого коксу. Внаслідок цього знижується пористість коксу. Збільшення показника дійсної щільності, як і зростання зольності коксу, сприяє також і збільшенню абразивної твердості. Введення кам'яновугільної смоли дозволяє забезпечити тісніший контакт між вугільними зернами шихти, що призводить до додаткового впорядкування вуглецевої структури отриманого коксу. Внаслідок також зростають показники дійсної щільності та структурної міцності і зменшується пористість коксу.

Таблиця 7

Фізико-хімічні властивості коксу

Варіант	Щільність та пористість за ДСТУ 7726:2015			Абразивна твердість, мг	Питомий електроопір за ДСТУ 8831:2019, Ом·м	Реакційна здатність за ДСТУ 7764:2014, см ³ /(г·с)
	уявна, г/см ³	дійсна, г/см ³	пористість, %			
1	0,976	1,780	45,2	95	1,9	0,50
2	0,990	1,786	44,6	75	3,2	0,52
3	1,002	1,821	45,0	75	2,1	0,48
4	0,985	1,791	45,0	90	3,2	0,54
5	0,953	1,793	46,8	77	4,3	0,57
6	0,980	1,792	45,3	95	3,6	0,52
7	0,946	1,785	47,0	88	2,3	0,50
8	0,960	1,752	45,2	78	4,9	0,53
9	0,976	1,798	45,7	75	2,1	0,50
10	0,995	1,806	44,9	85	3,3	0,63
11	0,990	1,830	45,9	91	2,8	0,58
12	0,976	1,805	45,9	82	4,3	0,61
13	0,980	1,818	46,1	80	2,9	0,62
14	0,976	1,768	44,8	91	2,2	0,55

Питомий електричний опір коксу характеризується достатньо низькими значеннями, що, як і невеликий вихід летких речовин, перш за все свідчить про досягнення потрібної готовності коксівної засипки [6]. Факторами, що сприяють додатковому зниженню питомого електричного опору за введення до складу шихти досліджених домішок, є впорядкування вуглецевої структури (у випадку кам'яновугільної смоли), краща електропровідність мінеральних речовин у порівнянні з органічними (у випадку відходів вуглезбагачення та коксового дрібняку), а також зниження електричного опору зернин коксового дрібняку за їх повторного нагріву [7].

Реакційна здатність коксу, отриманого з шихти із додаванням відходів вуглезбагачення, збільшується через зростання вмісту в мінеральній частині оксидів

заліза, кальцію, магнію, натрію, калію, які у відповідності із [8] інтенсифікують взаємодію коксу з діоксидом вуглецю за реакцією Белла-Будуара ($C+CO_2 \rightarrow 2CO$). Повторний нагрів зернин коксового дрібняку зменшує величину реакційної здатності, як це має місце в коксі із шихти з додаванням коксового дрібняку. Взаємодія кам'яновугільної смоли з іншими компонентами шихти також є причиною зниження реакційної здатності коксу внаслідок впорядкування вуглецевої структури матеріалу.

Дані про механічну міцність отриманих зразків дослідних коксів були оброблені з використанням методів математичної статистики [4]. В результаті отримали наступні рівняння регресії, які адекватно описують дослідні дані:

$$P_{25}=85,1-4,34X_2+2,08X_2X_3; \quad (1)$$

$$C_{10}=10,5+2,21X_2-0,16X_3+0,22X_1X_2-0,65X_2X_3-0,2X_1^2-0,52X_3^2, \quad (2)$$

де:

$$X_1 = \frac{v-5}{5}; \quad (3)$$

v – вміст у шихті відходів вуглезабагачення, %;

$$X_2 = \frac{d-1,5}{1,5}, \quad (4)$$

d – вміст у шихті коксового дрібняку, %;

$$X_3 = \frac{s-1,5}{1,5}, \quad (5)$$

s – вміст у шихті кам'яновугільної смоли, %.

Аналіз цих рівнянь свідчить, що додавання коксового дрібняку найбільше погіршує міцнісні показники коксу. Пов'язане це з тим, що у відповідності із сучасними уявленнями [3] коксовий дрібняк у шихті є інертним матеріалом, практично не здатним до термохімічної взаємодії з іншими компонентами. Тому запікання зернин коксового дрібняку рідкорухливими продуктами пластичної маси решти шихти здійснюється лише за поверхнею контакту зернин коксового дрібняку та залишкового матеріалу вугілля. Для отримання достатньо міцного коксу поверхня контакту має бути якомога більшою, що досягається лише за мікронного (до часток міліметра) подрібнення зернин коксового дрібняку. Для такого подрібнення потрібні кульові млини [9], які відсутні у вуглепідготовчих цехах, тобто за умов діючих підприємств технічної можливості для такого подрібнення немає.

В наших лабораторних дослідах ми використовували коксовий дрібняк, подрібнений лише до 100 % вмісту класу менше 3 мм. За таких достатньо великих розмірів зернин різниця в теплофізичних характеристиках коксового дрібняку та вугільної шихти призводить до виникнення на периферії зернин термомеханічних напружень. Внаслідок цього за механічного навантаження зерна коксового дрібняку стають центрами утворення тріщин, що і є причиною зниження міцності коксу.

Додавання до шихти лише кам'яновугільної смоли також помітно погіршує міцність коксу. Причина цього – у складі та властивостях базової шихти, яка головним чином складається з низько- та середньометаморфзованого вугілля, зокрема 50 % жирного вугілля D з товщиною пластичного шару $Y=28$ мм. Внаслідок цього отримувана вугільна шихта має товщину пластичного шару $Y=17$ мм, тобто вже характеризується деякою надлишковою спікливістю. Додавання до такої шихти кам'яновугільної смоли призводить до надлишкового збільшення кількості рідкорухливих продуктів, які виділяються за термічної деструкції. Для такої великої

кількості рідкорухливих продуктів величина поверхні, яку вони мають змочувати, занадто мала. Відомо, що коксування таких шихт призводить до отримання спіненого губчастого коксу, який, незважаючи на великі розміри кусків, характеризується недостатньою міцністю.

Вплив на міцнісні показники коксу вмісту в дослідних шихтах відходів вуглезабагачення менш помітний. Аналіз значущості коефіцієнтів при X_1 з використанням критерію Стьюдента [4] дозволив виключити відповідні незначущі складники з рівнянь (1) та (2). За коксування надмірно ожирнених шихт відходи вуглезабагачення, здатні до термохімічної взаємодії з іншими компонентами (а про це свідчить наявність помітної спікливої здатності, визначеної за методом Рога згідно із ДСТУ 7723:2015 «Вугілля кам'яне. Визначення індексу спікання методом Рога»), є достатньо ефективною опіснюючою добавкою, тому їх введення до складу шихти в кількості до 10 % не призводить до суттєвих змін властивостей коксу.

Для практичного використання отриманих залежностей необхідно від експериментальних рівнянь для лабораторної установки перейти до прогнозу за умов промислових коксових батарей. З цієї метою використали результати коксування шихт різного складу на батареї з печами з висотою камери 7 м та даними, отриманими за коксування шихт такого ж складу в лабораторній електропечі ДП «УХІН». Це дозволило методом кореляційного аналізу отримати наступні рівняння, які пов'язують між собою показники міцності коксу, отримані за різних умов:

$$M_{25}=0,58P_{25}+30,1; \quad (6)$$

$$M_{10}=0,99C_{10}+0,5. \quad (7)$$

Підстановка кодуючих співвідношень (3)-(5) в рівняння регресії (1) та (2) дозволяють отримати для лабораторних умов залежність міцності коксу від масової частки домішок в шихті:

$$P_{25}=91,5-4,3d-1,39s+0,93ds; \quad (8)$$

$$C_{10}=7,3+0,36v+1,77d+1,03s+0,03dv-0,29ds-0,01v^2-0,23s^2. \quad (9)$$

Підставивши (8) та (9) відповідно в (6) та (7), остаточно отримуємо прогнозні залежності для показників міцності промислового коксу:

$$M_{25}=83,2-2,49d-0,81s+0,54ds; \quad (10)$$

$$M_{10}=7,7+0,036v+1,75d+1,02s+0,03dv-0,29ds-0,01v^2-0,023s^2. \quad (11)$$

Аналіз цих залежностей дозволяє зробити наступні висновки. Вільні складники в рівняннях (10) та (11) відповідають з точністю до похибки визначення про-

гнозним значенням механічної міцності коксу з базової шихти. Ці показники, а також зольність коксу відповідають вимогам для марки КДЗ за діючими в Україні технічними умовами ТУ У 322-00190443-114-96 «Кокс доменний». В той же час сірчистість коксу відповідає більшим значенням (для марки КД2), тобто кокс, отриманий з базової шихти, має властивості, не передбачені діючими загальногалузевими нормативно-технічними документами. Тобто, за виникнення необхідності коксування шихт з добавками за роботи підприємств в умовах нестабільного вуглепостачання, можливий випуск коксу за спеціальними технічними умовами, погодженими зі споживачем.

Додавання до базової шихти відходів вуглезбагачення в кількості до 10 % не призводить до суттєвих змін показника M_{25} . Показник M_{10} лишається практично незмінним за внесення до шихти відходів вуглезбагачення в кількості до 4 % включно. Подальше збільшення вмісту відходів вуглезбагачення в шихті (до 10 %) призводить до того, що показник M_{10} знижується в середньому на 0,1 % на кожен відсоток внесеної домішки. Це зумовлене взаємодією відходів вуглезбагачення, які мають, як вже зазначалось, помітну спікливу здатність, з іншими компонентами шихти за коксування. Слід також зазначити, що внесення до шихти відходів вуглезбагачення призводить до збільшення зольності отриманого коксу на 0,4 % на кожен відсоток добавки. Введення в шихту коксового дрібняку в кількості до 3 % помітно погіршує міцнісні властивості коксу. На 1 % добавки показник M_{25} знижується в середньому на 2,5 %, а M_{10} стає більшим в середньому на 1,8 %. Пояснення цьому – в недостатній величині ефективної поверхні коксового дрібняку в подрібненні <3 мм для взаємодії з компонентами базової шихти.

Також погіршує міцнісні властивості коксу, хоча і в меншому ступені, введення до шихти кам'яновугільної смоли в кількості до 3 %: на кожен відсоток добавки показник M_{25} знижується в середньому на 0,8 %, а показник M_{10} зростає в середньому на 0,3 %. Причина цього – надлишкова кількість утворених рідкорухливих продуктів. За сумісного додавання до шихти коксового дрібняку та кам'яновугільної смоли властивості коксу погіршуються менше, ніж слід було б очікувати за даними, отриманими при додаванні кожної добавки окремо. Так, якщо додавати до шихти коксовий дрібняк та смолу у співвідношенні 1:1 в кількості до 3 % кожної добавки, то на кожен відсоток введеного дрібняку та смоли показник M_{25} погіршується не на 3,3 %, як слід було б очікувати, а в середньому всього на 1,7 %, показник M_{10} – не на 2,1 %, а в середньому на 1,2 %. Пояснити таке явище можна частковою компенсацією нестачі поверхні для гетерогенної взаємодії інтенсифікацією на ній міжфазних процесів через збільшення кількості рідкорухливих продуктів.

Залежності (10) та (11) можна використовувати і для прогнозу показників якості коксу, отриманого з шихт будь-якого складу в межах інтервалів варіювання у відповідності з табл. 3 шляхом прямої підстановки, а вирішуючи їх відносно змінних d , s та v , можна вирішити й зворотню задачу – визначити склади шихт, які дозволяють отримувати кокс заданої якості.

Слід також зазначити, що використання рівнянь (10) та (11) коректно лише за періоду коксування 15 годин 30 хвилин на батареї з висотою камери 7 м, оскільки саме для цих умов були отримані залежності (6) та (7). За інших періодів отримані за цими рівняннями результати мають коригуватись на відповідний період коксування з урахуванням залежності властивостей коксу від періоду коксування. На зазначеній батареї такі залежності для M_{25} були отримані під час її освоєння. Їх аналіз свідчить, що за періодів коксування до 24 годин збільшення періоду на 1 годину в середньому призводить до збільшення показника механічної міцності за M_{25} на 0,4 %, і навпаки – за зменшення періоду коксування M_{25} знижується в середньому на таку ж величину. Роботами, виконаними на батареях аналогічної конструкції на іншому підприємстві, показано, що для зниження показника M_{10} на 0,1 % період коксування треба збільшити в середньому на 2 години, і навпаки – зниження періоду коксування призводить до відповідного зростання показника M_{10} [10].

Висновки

1. За недостатньої та некомплектної кількості вугілля, що надходить на коксохімічне підприємство, можливе отримання доменного коксу з шихти наступного складу (%): Г – 20; Ж – 50; К – 30 з очікуваними показниками механічної міцності: $M_{25}=83,2$ %, $M_{10}=7,7$ %.

2. Додавання до цієї шихти до 4 % відходів вуглезбагачення практично не змінює показники міцності отриманого коксу. За вмісту відходів вуглезбагачення від 4 % до 10 % показник M_{25} отриманого коксу так само змінюватиметься незначно, а показник M_{10} знижуватиметься в середньому на 0,1 % на кожен відсоток добавки. Крім того, введення до шихти відходів вуглезбагачення призводить до збільшення зольності коксу в середньому на 0,4 % на кожен відсоток добавки.

3. За введення до шихти коксового дрібняку в кількості до 3 % показник M_{25} знижується в середньому на 2,5 %, а M_{10} збільшується в середньому на 1,8 % на кожен відсоток домішки.

4. За внесення до шихти кам'яновугільної смоли в кількості до 3 % показник M_{25} знижується в середньому на 0,8 %, а M_{10} зростає в середньому на 0,3 %. За сумісного введення в шихту коксового дрібняку та смоли в співвідношенні 1:1 в кількості до 3 % кожної добавки показник M_{25} погіршується в середньому на 1,7 %, а

M10 – на 1,2 % на кожен відсоток доданого дрібняку та смоли.

Бібліографічний список

1. Хаустова В.Є. Напрямки розвитку коксової та безкокової металургії / В.Є. Хаустова, М.О. Кизим, Є.І. Котлярів, І.В. Шульга // Вуглехімічний журнал. – 2025. – № 4. – С. 3-13. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2025-0-4-3-13>.

2. Тютюнников Ю.Б. Органічні добавки у виробництві коксу / Ю.Б. Тютюнников, Л.Г. Сінцєрова, Ю.І. Гречко, В.С. Лялюк. – Київ: Техніка, 1971. – 96 с.

3. Шульга І.В. Основи технології коксування вугілля: навч. посібник / І.В. Шульга, Д.В. Мірошніченко, О.В. Бозоявленська. – Харків – Тернопіль: Крок, 2022. – 128 с. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/57769>.

4. Вінарський М.С. Планування експерименту у технологічних дослідженнях / М.С. Вінарський, М.В. Лур'є. – Київ: Техніка, 1969. – 168 с.

5. Мірошніченко Д.В. Лабораторний метод визначення виходу коксу та основних хімічних продуктів коксування в 5-кг печі конструкції УХІН / Д.В. Мірошніченко // Довідник коксохіміка. 3-тє вид. Т. 1. Вугілля для коксування. Збагачення вугілля. Підготовка вугілля до коксування. – Харків: ВД «ІНЖЕК», 2010. – С. 86-88.

6. Шульга І.В. Теоретичний аналіз процесів формування електропровідності коксу / І.В. Шульга, В.В. Владимиренко // Вуглехімічний журнал. – 2023. – № 5. – С. 11-17. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-5-11-17>

7. Шульга І.В. Теоретичні основи удосконалення методу визначення питомого електричного опору як показника готовності коксу / І.В. Шульга, В.В. Владимиренко // Сучасні технології переробки паливних копалин: тези доповідей IV міжнародної науково-технічної конференції, 15-16 квітня 2021 р. – Харків: НТУ ХПІ, 2021. – 105 с. – С. 46. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/52734/5/Conference_NTU_KhPI_2021_Suchasni_tekhnolohii_pererobky.pdf

8. Ярошевський С.Л. Ресурсозберігаючі технології металургійного виробництва на основі використання українського вугілля / С.Л. Ярошевський, А.В. Ємченко, І.В. Шульга [та ін.] – Харків: Контраст, 2012. – 204 с.

9. Тютюнников Ю.Б. Технологічні схеми, розрахунок та моделювання промислових установок газифікації вугілля / Ю.Б. Тютюнников, М.С. Шептовицький, І.В. Шульга. – Харків: ХДЕУ, 1996. – 80 с.

10. Шульга І.В. Технологічний процес коксування // Довідник коксохіміка. 3-тє вид. Т. 2. Виробництво коксу. – Харків: ВД «ІНЖЕК», 2014». – С. 13-42.

Рукопис надійшов до редакції 09.09.2025

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-5-32-41

Specialty 161. U.D.C. 662.741.3

PROPERTIES OF COKE FROM COAL BLENDS WITH VARIOUS CO-PRODUCTS

© O.L. Borysenko¹, I.V. Shulga², Yu.V. Teleshev³

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

Ye.I. Kotlyarov⁴

Research Centre for Industrial Problems of Development of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1a Inzhenernyi lane, Kharkiv, 61166, Ukraine

¹ Borysenko Oleksandr Lyudvikovich, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Acting Director, e-mail: zd@ukhin.org.ua

² Shulga Igor Volodymyrovych, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Head of the Coke Department, e-mail: ko@ukhin.org.ua

³ Teleshev Yuriy Volodymyrovych, Ph.D. in Technical Sciences, e-mail: 196112juv@gmail.com

⁴ Kotlyarov Yevhen Ivanovych, Ph.D. in Economics, Associate Professor, Head of the Energy Security and Energy Conservation Sector, e-mail: ekotlarov@i.ua

It has been shown that the current operating conditions of Ukraine's coke chemical enterprises are characterised by significant difficulties in coal supply, caused both by the temporary loss of most of the coking coal production capacity and by logistical difficulties in supplying imported coal. Therefore, research conducted at one of the largest coke chemical enterprises in Ukraine on the coking of charges with the addition of coke fines, coal tar and accumulated coking coal enrichment waste is relevant. It has been

established that coke of acceptable quality can be obtained by adding the following additives to the charge of the specified composition (%): G – 20; Z – 50; K – 30. Adding up to 4 % of enrichment waste to the charge practically does not change the strength indicators of the coke obtained, but increases its ash content by an average of 0.4 % for each percentage of the additive added. When adding up to 3 % of coal tar due to over-greasing of the charge, the M25 index decreases by an average of 0.8 %, and M10 increases by 0.3 %. When up to 3 % of coke fines are added to the charge, the M25 index decreases by an average of 2.5 %, and the M10 index increases by 1.8 % for each percentage of the additive added.

At the same time, it is important to grind the additive as finely as possible. When using a mixture of fines and resin in a 1:1 ratio in an amount of up to 3% of each additive, the M25 index decreases by an average of 1.7 %, and the M10 index increases by 1.2 % for each percentage of the additive. This reduction in negative impact is explained by a decrease in the discrepancy between the amount of low-mobility products formed during coking and the size of the surface they wet. The results obtained confirm the need to search for new ways to use the studied by-products in both traditional and fundamentally new areas of application.

Keywords: coke chemical production, coke fines, coal tar, coal enrichment waste, coal charge, coking, coke quality.

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

Manuscript received 2025/09/09

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-5-41-48

Спеціальність 161. УДК 519.713: 628.4.02

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЇ МОКРО-ВАПНЯКОВОЇ ДЕСУЛЬФУРИЗАЦІЇ ДИМОВИХ ГАЗІВ КОКСОВИХ ПЕЧЕЙ

© О.Л. Борисенко¹, О.М. Касимов²

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)», 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна

¹ Борисенко Олександр Людвинович, канд. техн. наук, с.н.с., в.о. директора, e-mail: zd@ukhin.org.ua

² Касимов Олександр Меджитович, докт. техн. наук, проф., зав. науково-технічного відділу, e-mail: kassimov2011@gmail.com

У статті розглянуто завдання та результати формування нових підходів до методологічного забезпечення комплексної оцінки екологічності системних природно-техногенних об'єктів. Розроблено схему алгоритмічного забезпечення комплексного аналізу для вирішення завдань екологічної безпеки на рівні природно-техногенних комплексів з використанням методів MIPS- та ризик-аналізу. Представлено результати екологічної оцінки із застосуванням розробленого методу при аналізі технології мокро-вапнякової десульфурації газів, що відходять, коксових печей. Показано, що комплекс методів MIPS- та ризик-аналізу дозволяє визначити екологічність системного об'єкта в цілому, а також встановити небезпеку факторів впливу на навколишнє середовище, оцінити позитивний ефект від можливих мимовільних процесів стабілізації безпеки на виході із системи, виявити механізми регулювання ризик-ситуації за можливих умов дестабілізації. Аналіз динамічності природно-техногенних об'єктів виду "стан1-процес-стан2" дозволяє в умовах техногенного навантаження виявити фактори зниження екологічного ризику. Запропоновано алгоритмічне забезпечення комплексної оцінки екологічності конкретного промислово-технологічного комплексу, а також програмне забезпечення з термодинамічного розрахунку ймовірності проходження стабілізуючих процесів та визначення можливостей зниження екологічної небезпеки для об'єктів навколишнього середовища. За результатами MIPS- та ризик-аналізу встановлено, що технологія мокро-вапнякового сіроочищення димових викидів системи опалення коксохімічних печей відповідає допустимим екологічним нормативам. Виявлено механізми підвищення екологічної безпеки зазначеної технології за рахунок синергетичних ефектів.

Ключові слова: коксові печі, димові гази, десульфуризація, мокро-вапнякова технологія, MIPS-аналіз, екологічна безпека.

Автор для листування О.Л. Борисенко, e-mail: zd@ukhin.org.ua

При отриманні вихідних даних для оцінки ступеня техногенного навантаження на всі сфери навколишнього середовища (НС) виникають неточності та невизначеності в характеристиках досліджуваних об'єктів. Для усунення подібних проблем інформація щодо визначальних вихідних даних забезпечується за допомогою моніторингових систем та розробки інформаційно-методичної бази на основі нових підходів у вирішенні завдань екологічної оцінки та контролю екологічної якості системних об'єктів.

Системний об'єкт – це природно-техногенний комплекс (ПТК), що розглядається як пов'язаність техніко-економічної системи (джерело техногенного навантаження) та НС (індикатор якості). Кількісна характеристика комплексної оцінки має три основні фактори: рівень екологічності еколого-економічної системи на основі показників MIPS-аналізу, ступінь розвитку дії факторів та процесів впливу та екологічна оцінка природно-техногенної системи у вигляді сумарної характеристики екологічного ризику [1].

У попередніх роботах [2-4] вирішувалися завдання:

- розробка методичної оцінки якості природних об'єктів з урахуванням постійної динамічності техногенних систем та їх взаємозв'язку з НС;
- формування методики комплексної оцінки екологічності ПТК на основі аналізу «стан1-процес-стан2» із застосуванням елементів MIPS-аналізу, положень ризик-теорії та правил термодинамічного розрахунку для виявлення імовірнісних процесів;
- розробка алгоритму реалізації комплексної екологічної оцінки об'єкта «техногенна система – НС»;
- розробка програмного забезпечення термодинамічних розрахунків для визначення ступеня екологічної безпеки систем при оцінці впливу викидів забруднюючих речовин (ЗР) на об'єкти НС.

Система комплексної оцінки екологічності промислового об'єкта полягає в прийнятті динамічної природи природно-техногенних процесів, що слугують зв'язком із довкіллям. При цьому враховується аналіз порушень у стані систем, прояви процесів самоорганізації та мимовільних змін, що призводять до стабілізації, досягнення об'єктом внутрішнього та зовнішнього гомеостазу.

Метою даної роботи було: визначення доцільності використання технології мокро-вапнякової десульфурації газів, що відходять коксових печей (ТМДГ КП), тобто основ комплексної оцінки екологічності ПТК за певною аналітичною системою дослідження «стан1-процес-стан2» і створення методичного забезпечення процесу визначення якості природних об'єктів.

Методика исследования и анализ результатов.

Методом узагальнюючої оцінки якості досліджуваних систем в екологічному управлінні ПТК є MIPS-аналіз, що виступає як інструмент оцінки екологічної ефективності об'єкта [2-4]. Специфіка методу дозволяє виявити точки небезпечних екологічних впливів, які є основою визначення факторів запобігання пошкодженням та зменшення витрат на відшкодування екологічних збитків.

В результаті MIPS-аналізу для оцінки превентивних заходів щодо захисту об'єктів НС беруться до уваги всі матеріальні потоки з метою запобігання не лише відомим, а й ще невідомим проблемам охорони навколишнього середовища.

Екологічні ризики орієнтовані на оцінку результативного стану систем НС з визначенням ступеня негативного впливу процесів дестабілізації за характеристиками невідповідності нормативним показникам (ГДК, ГДС, опосередковано – ґрунт). Ризик-оцінка являє собою узагальнену інформацію про рівні та наслідки дії шкідливих та небезпечних факторів на природні об'єкти:

$$Risk = -P \cdot \ln(P), \quad P=C/ПДК, \quad (1)$$

де P – ступінь відхилення показника від нормативних меж; ГДК – гранично допустима концентрація забруднюючої речовини (у викидах, скиданнях, ґрунті), C – фактична концентрація поллютанту.

Процедура оцінки ризику передбачає послідовну ідентифікацію небезпек, оцінку ризику впливу та характеристику ризику. Вхідна моніторингова інформація при аналізі станів природно-техногенних систем розглядається як основа факторного аналізу для визначення дестабілізуючих впливів та виявлення процесів, що самоорганізуються, тобто спонтанних.

Оцінка досягнення рівноваги в системі ґрунтується на положеннях синергетики про організаційні можливості хаотичних структур з використанням ентропійної функції стану: $\Delta S_i + \Delta S_e = 0$, де ΔS_i – рівень ен-

тропії у системі; ΔS_e – зміна факторів, що впливають (негативний потік ззовні).

Порушення стабільності в системах об'єкта як відхилення від рівноважної, стаціонарної взаємодії їх зовнішнього та внутрішнього характеру визначаються поняттям «екологічний ризик» [5]. Зменшення нестабільності можливе завдяки зростанню позитивного впливу результатів спонтанних процесів за участю негативних факторів зовнішнього впливу та внутрішніх стабілізуючих механізмів систем. Оцінка ймовірності таких змін ґрунтується на постулатах Другого закону термодинаміки з розрахунком змін ентропії:

$$\Delta S = \sum [n_i(S_i)]_{\text{кшц}} - \sum [n_j(S_j)]_{\text{поч}}, \quad \Delta S_T^* = \Delta S_{298}^* + \sum [n_i(S_T^* - S_{298}^*)_i]_{\text{кшц}} - \sum [n_j(S_T^* - S_{298}^*)_j]_{\text{поч}} \quad (1)$$

$$\Delta_r G(298) = \Delta_r H_{298} - 298,15 \Delta_r S_{298}; \quad (2)$$

$$\Delta_r G_T^0 = \Delta_r H_{298} - T \Delta_r S_{298} + \Delta C_p \left[(T - 298,16) - T \ln \frac{T}{298,16} \right] \quad (3)$$

$$\Delta G(T) = \Delta H_{298} - T \Delta S_{298} + \sum_{i=0}^i [n_i(H_n(T) - H_n(298))]_i - \sum_{j=0}^j [n_j(H_m(T) - H_m(298))]_j - T \left[\sum_{i=0}^i [n_i(S_n(T) - S_n(298))]_i \right] + T \left[\sum_{j=0}^j [n_j(S_m(T) - S_m(298))]_j \right] \quad (4)$$

$$\Delta S = C_p (\ln T_2 - \ln T_1) = 2,3 \times C_p \log \frac{T_2}{T_1}, \quad (5)$$

де $S, \Delta S, S_T^0, S(T), S_{298}^0, S(298), \Delta_r S_{298}$ – ентропія, зміна ентропії, стандартне значення ентропії за даної температури T і за $T=298$ К, зміна ентропії реакції при 298 К; $H, \Delta H, H(T), H(298), \Delta_r H_{298}$ – ентальпія, зміна ентальпії, значення ентальпії за даної температури T і при $T=298$ К, зміна ентальпії реакції при $T=298$ К; $C_p, \Delta C_p$ – теплоємність ізобарна, зміна ізобарної теплоємності.

Об'єктивно оцінити можливості мимовільної стабілізації стану складного об'єкта та виявити необхідні регулюючі впливи з метою посилення позитивних змін дозволяє комплексне використання MIPS-аналізу та визначення ризик-параметрів впливу на об'єкти НС із встановленням небезпечних факторів дестабілізації у системі дослідження ПТК. На рис. 1. запропоновано алгоритм реалізації розробленого комплексного підхо-

ду.

Запропоновано для практичної реалізації методу комплексної оцінки екологічності системних природно-техногенних об'єктів апробовано на оцінці ТМДГ КП коксових печей коксохімічних підприємств України (табл. 1).

Технологія очищення заснована на нейтралізації лужними реагентами (гідроксидом або карбонатом кальцію) сірчаної кислоти, що утворюється в результаті розчинення діоксиду сірки, що міститься в димових газах від коксових печей. Екологічна безпека при існуючому ступені уловлювання діоксиду сірки може бути посилена за рахунок процесів нейтралізації небезпечних сполук у газах та відходах за рахунок мимовільних реакцій, що дозволяє уникнути при технологічних порушеннях або аваріях забруднення об'єктів НС та заподіяння шкоди здоров'ю людини.

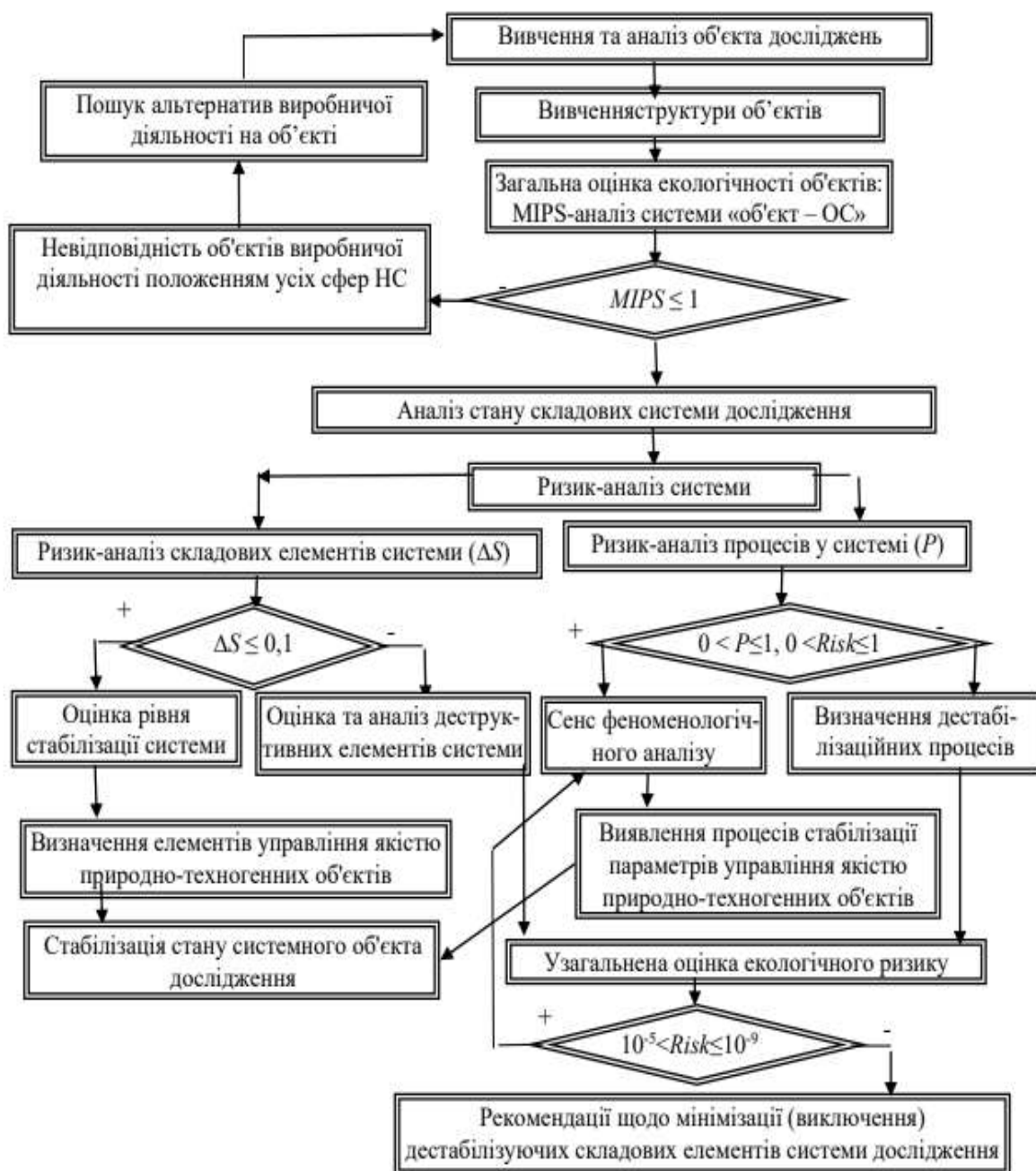


Рис. 1 Алгоритм комплексної оцінки екологічності системних природно-техногенних комплексів

Оцінка екологічної безпеки мокро-вапнякової технології десульфуризації димових газів коксових печей визначається технічним та еколого-економічним аналізом стану досліджуваної системи – MIPS-аналізом та

виявленням екологічних ризиків шляхом застосування термодинамічного аналізу процесів, що регулюють ступінь техногенного навантаження на НС за рахунок імовірнісних процесів. 2).

Таблиця 1

Основні параметри установки мокро-вапнякової технології десульфуризації димових газів коксових печей

Характеристика	Значення
Температура димових газів перед установкою	130/60 °С
Сорбент	Вапняк, вапно
Споживана енергія (% загальної електричної потужності)	1 – 3 %
Мольне співвідношення Ca/S	1.02 -1.1
Побічні продукти	Гіпс
Чистота гіпсу	90 – 95 %
Вміст СаО у вапняку	80-85%
Загальний ступінь уловлювання SO ₂	92 – 98 %
Ступінь видалення H ₂ SO ₄	95 – 99 %
Ступінь видалення зважених твердих часток	>70 %

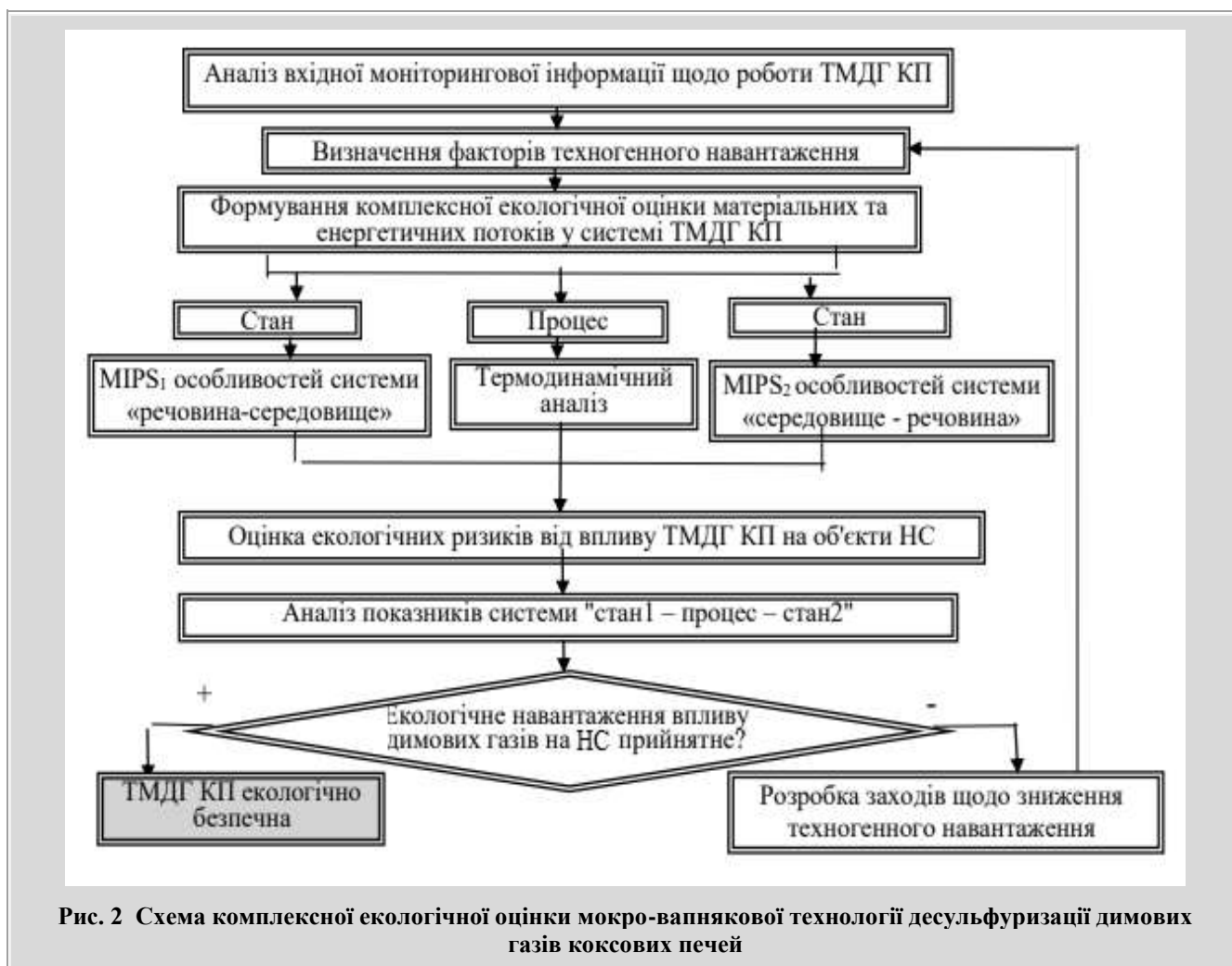


Рис. 2 Схема комплексної екологічної оцінки мокро-вапнякової технології десульфуризації димових газів коксових печей

Показники MIPS₁ орієнтовані на вхідні характеристики ТМДГ КП, що розглядається. За умови, що кожен вхід обов'язково стає виходом, отримують непряму

оцінку можливого впливу виходу на НС, вимірюючи вхід, тобто враховують всі компоненти димових газів при оцінці небезпек (табл. 2.).

Таблиця 2

MIPS-анализ исходного состава дымовых газов (MIPS₁)

Показники	Значення	M _I abiot	MIPS ₁
CaCO ₃	0,58	5,5	0,106
SO ₂	0,0285	0,7	0,041
SO ₃	0,11	0,25	0,43

Результати термодинамічного аналізу процесів, які можуть призвести до дестабілізації екологічної безпеки об'єкта, що досліджується, дозволяють виділити показники напруги. Програмне забезпечення реалізовано у Microsoft Visual Studio2005 мовою C#. У розробленому програмному продукті дані про характеристики реакцій

у досліджуваному потоці кожного чинника, зокрема температурного режиму, вводяться користувачем з клавіатури ПК. Далі вони передаються до функцій, де ведеться розрахунок за зазначеною методикою. Результати ентропійної оцінки можливостей наведених процесів виводяться у тому вікні (рис. 3).

```

Введіть кількість елементів при вході :
1
Введіть кількість елементів при виході :
2
m[0]=1
n[0]=1
n[1]=1
Введіть початкові дані :
Hm298[0]=52.5
Hn298[0]=38.2
Hn298[1]=217.98
Sm298[0]=0.2193
Sn298[0]=0.2305
Sn298[1]=0.1146
Для T=500
HmT298[0]=23.290
HnT298[0]=21.2
HnT298[1]=10.393
SmT298[0]=0.279343
SnT298[0]=0.24612
SnT298[1]=0.125353
для T=1000
HmT298[0]=67.576
HnT298[0]=61.2
HnT298[1]=20.786
SmT298[0]=0.339186
SnT298[0]=0.300303
SnT298[1]=0.139761

Рішення :
dltah298=203.68
dltas298=0.126
dltag298=166.192
dltagT<500>=103.018
dltagT<1000>=-8.588

```

Рис. 3 Результати термодинамічного аналізу процесів технології десульфурації димових газів коксових печей

Екологічна оцінка впливу показників напруги на об'єкти НС заснована на визначенні MIPS₂-чисел, як відхилень у матеріальних потоках, та ризик-характеристик стану об'єктів та процесів, пов'язаних з порушенням їх екологічності, як відхилень від рівноважного стану системи дослідження. За даними розрахунків елементів комплексної оцінки безпеки об'єкта приймається рішення щодо заходів екологічної доціль-

ності застосування описаної технології мокро-вапнякової десульфурації димових газів коксових печей:

- MIPS₁ < MIPS₂ – висока за значенням ризик-оцінка – ситуація небезпеки під час впровадження технології;
- MIPS₁ > MIPS₂ – низька ризик-оцінка складових виробництва – ситуація екологічної безпеки технології, що вивчається (табл. 3).

Таблиця 3

Екологічна оцінка мокро-вапнякової технології десульфурації димових газів коксових печей

Показники	Значення	ГДК (ГДС) мг/л	МІ	MIPS ₂	P	Risk
Викиди (атмосферне повітря)						
SO ₂	0,00029	500	0,7	0,0004	5,8·10 ⁻¹⁰	1,2·10 ⁻⁸
SO ₃	0,0015	150	4,1	0,0004	10 ⁻⁸	1,84·10 ⁻⁷

Результати екологічної оцінки впливу відхідних газів, скидів та відходів на об'єкти НС при використанні ТМДГ КП за розробленою методикою показують, що дана технологія є екологічно безпечною, а рівень ризику впливу хімічних показників на атмосферне повітря, водні системи та ґрунт відповідно до нормативної бази стану НС визначено як допустимий.

Висновки

Комплекс методів MIPS- та ризик-аналізу дозволяє визначити екологічність системного об'єкта в цілому, а також встановити небезпеку факторів впливу на НС, оцінити позитивний ефект від можливих мимовільних процесів стабілізації безпеки на виході із системи, виявити механізми регулювання ризик-ситуації за можливих умов дестабілізації.

Аналіз динамічності природно-техногенних об'єктів виду "стан1-процес-стан2" дозволяє в умовах техногенного навантаження виявити фактори зниження екологічного ризику.

Запропоновано алгоритмічне забезпечення комплексної оцінки екологічності конкретного ПТК.

Запропоновано програмне забезпечення з термодинамічного розрахунку ймовірності проходження стабілізуючих процесів та визначення можливостей зниження екологічної небезпеки для об'єктів НС.

За результатами MIPS- та ризик-аналізу встановлено, що технологія мокрої вапнякової сіроочищення газів коксохімічних печей, що відходять, відповідає допустимим екологічним нормативам. Виявлено меха-

нізми підвищення її безпеки за рахунок синергетичних ефектів.

Бібліографічний список

1. Згуровський М.З. Глобальне моделювання процесів сталого розвитку у контексті якості і безпеки життя людей / М.З. Згуровський, А.Д. Гвішіані. – Київ: Політехніка. 2008. – 331 с.
2. Касимов О.М. Концепція комплексної оцінки системних об'єктів природно-техногенних і ландшафтно-геохімічних комплексів // О.М. Касимов, Т.В. Козуля, Д.І. Ємельянова / Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2012. – № 4/41 (58). – С. 62-68.
3. Касимов О.М. Методи та модель системи комплексної оцінки екологічного стану природно-техногенних територій / О.М. Касимов, Т.В. Козуля, Д.І. Ємельянова // Екологія та промисловість. – 2013. – № 1 (34). – С. 21-27.
4. Касимов О.М. Застосування методики термодинамічної оцінки впливу вапнякової технології мокрого сіроочищення газів на об'єкти навколишнього середовища / О.М. Касимов, Т.В. Козуля, Д.І. Ємельянова // Екологія та промисловість. – 2016. – № 1. – С. 100-104.
5. Козуля Т.В. Теоретико-практичні основи методології комплексної оцінки екологічності територіальних і об'єктових систем / Т.В. Козуля, Н.В. Шаронова, Д.І. Ємельянова [та ін.] // Проблеми інформаційних технологій. – 2012. – № 01 (011). – С. 37-45.

Рукопис надійшов до редакції 12.09.2025

ECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE WET LIMESTONE DESULPHURISATION TECHNOLOGY FOR COKE OVEN FLUE GASES© O.L. Borysenko¹, O.M. Kasimov²

STATE ENTERPRISE 'UKRAINIAN STATE SCIENTIFIC AND RESEARCH INSTITUTE OF COAL CHEMISTRY (UKHIN)', 61023, Kharkiv, 7 Vesnina St., Ukraine

¹ Borysenko Oleksandr Lyudvikovich, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Acting Director, e-mail: zd@ukhin.org.ua² Kasimov Oleksandr Medzhitovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Science-Technical Department, e-mail: kassimov2011@gmail.com

The article discusses the tasks and results of developing new approaches to methodological support for comprehensive assessment of the environmental friendliness of systemic natural and man-made objects. A scheme of algorithmic support for comprehensive analysis has been developed to solve environmental safety problems at the level of natural and man-made complexes using MIPS and risk analysis methods. The results of an environmental assessment using the developed method in the analysis of wet limestone desulphurisation technology for coke oven off-gases are presented. It is shown that a complex of MIPS and risk analysis methods allows determining the environmental friendliness of a systemic object as a whole, as well as establishing the danger of factors affecting the environment, assessing the positive effect of possible spontaneous processes of stabilising safety at the system output, and identifying mechanisms for regulating risk situations under possible conditions of destabilisation.

Analysis of the dynamics of natural and man-made objects of the 'state1-process-state2' type allows identifying factors that reduce environmental risk under conditions of man-made stress. Algorithmic support for a comprehensive assessment of the environmental friendliness of a specific industrial and technological complex is proposed, as well as software for thermodynamic calculation of the probability of stabilising processes and determination of opportunities to reduce environmental hazards for environmental objects. Based on the results of MIPS and risk analysis, it has been established that the wet limestone desulphurisation technology for flue gas emissions from coke oven heating systems complies with acceptable environmental standards. Mechanisms for improving the environmental safety of this technology through synergistic effects have been identified.

Keywords: coke ovens, flue gases, desulphurisation, wet limestone technology, MIPS analysis, environmental safety.

Corresponding author: O.L. Borysenko, e-mail: zd@ukhin.org.ua

Manuscript received 2025/09/12

ВИКОРИСТАННЯ РЕГЕНЕРОВАНИХ РОЗЧИННИКІВ У ВИРОБНИЦТВІ ПРОМИСЛОВИХ ЕМАЛЕЙ ТА ГРУНТІВ© Д.В. Мірошніченко¹, С.Л. Жаров², О.В. Квасов³, Д.К. Кузін⁴, В.В. Марченко⁵, С.А. Набока⁶

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

¹ Мірошніченко Денис Вікторович, докт. техн. наук, проф., зав. кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива (ТПНГ та ТП), e-mail: dymir79@gmail.com² Жаров Сергій Леонидович, аспірант кафедри ТПНГ та ТП, e-mail: slzharov1977@gmail.com³ Квасов Олександр Вікторович, аспірант кафедри ТПНГ та ТП, e-mail: 0099778@gmail.com⁴ Кузін Дмитро Костянтинович, аспірант кафедри ТПНГ та ТП, e-mail: kuzin21061985@gmail.com

⁵ Марченко Віктор Васильович, аспірант кафедри ТПНГ та ТП, e-mail: 0997727@gmail.com

⁶ Набока Сергій Андрійович, аспірант кафедри ТПНГ та ТП, e-mail: naseanua@gmail.com

Метою роботи є виявлення сучасних тенденцій лакофарбової промисловості в контексті глобальної стратегії сталого розвитку та впровадження принципів «зеленої» хімії. Проаналізовано економічні та екологічні виклики, зокрема зростання вартості сировини, посилення вимог екологічного законодавства та проблеми, пов'язані з утилізацією небезпечних відходів. Висвітлено значення лакофарбових матеріалів у промисловості та їхній внесок у формування летких органічних сполук, що впливають на довкілля та здоров'я людини. Зокрема показано, що у своїй сукупності наявні виклики створюють потрібний тиск на виробників промислових лакофарбових матеріалів: економічний (зростання витрат), нормативний (підвищені вимоги) та екологічний (відповідальність за відходи). Зазначено, що технологія регенерації розчинників пропонує комплексне вирішення цих проблем, перетворюючи витрати на утилізацію на додатковий джерело сировини, зменшуючи залежність від коливань цін на ринку та забезпечуючи дотримання суворих екологічних стандартів.

Наголошено на необхідності зменшення ресурсозалежності виробництва та переходу до принципів циркулярної економіки. Окрему увагу приділено джерелам утворення та компонентному складу відпрацьованих розчинників у виробництві лакофарбових матеріалів. Подано огляд сучасних методів регенерації розчинників як ключових напрямів екологізації та підвищення ефективності виробництва лакофарбових матеріалів. Обґрунтовано необхідність пошуку інноваційних технологій – мембранних, адсорбційних, екстракційних і, особливо, гібридних методів, які поєднують переваги різних процесів і дозволяють досягати високої чистоти регенованих розчинників при мінімальних енерговитратах, забезпечують можливість зневоднення, селективного виділення домішок і повного замикання матеріальних потоків.

Ключові слова: лакофарбові матеріали, леткі органічні сполуки, відпрацьовані розчинники, регенерація, «зелена» хімія, циркулярна економіка, сталий розвиток.

Автор для листування Д.В. Мірошніченко, e-mail: dvmir79@gmail.com

1. Глобальна тенденція до сталого розвитку та впровадження принципів «зеленої» хімії в промисловості

Сучасна глобальна промисловість перебуває на етапі глибокої трансформації, зумовленої посиленням світової тенденції до сталого розвитку. Ця парадигма, закріплена в Цілях сталого розвитку ООН, передбачає відповідне поєднання економічного зростання, соціальної рівності та збереження навколишнього середовища [1]. У відповідь на ці виклики хімічна промисловість, як ключовий сектор економіки, активно впроваджує принципи «зеленої» хімії - філософії, спрямованої на профілактику забруднення на джерелі й мінімізацію екологічного сліду.

Дванадцять принципів «зеленої» хімії стають практичним орієнтиром для інновацій. Вони акцентують увагу на запобіганні утворенню відходів, розробці безпечних речовин, зниженні енергоємності процесів, використанні відновлюваної сировини та забезпеченні розкладності продуктів після їх експлуатації [2].

Саме в цьому ключі технологія регенерації відпрацьованих розчинників демонструє свою стратегічну відповідність. Вона не лише вирішує проблему небезпечних відходів, але й реалізує кілька принципів «зеленої» хімії одночасно: запобігає забрудненню, зменшує використання викопної сировини шляхом замикання матеріального потоку та сприяє енергоефективності порівняно з виробництвом первинних розчинників. Таким чином, перехід до використання регенованих розчинників є конкретним і ефективним кроком у напрямку циркулярної економіки та сталого, екологічно орієнтованого промислового виробництва [3, 4].

2. Економічні та екологічні виклики: зростання вартості сировини, посилення екологічного законодавства (REACH, тощо), проблема утилізації небезпечних відходів

Виробництво промислових лакофарбових матеріалів (ЛКМ) стикається з низкою серйозних системних викликів, які роблять впровадження регенерації розчинників економічно та екологічно невідкладним. По-перше, це стрімке зростання вартості сировини, зумовлене коливаннями цін на нафту, геополітичною нестабільністю та ланцюговими порушеннями поставок. Це безпосередньо впливає на собівартість органічних розчинників, змушуючи виробників шукати альтернативні джерела сировини для підтримки конкурентоспроможності [5].

По-друге, значно посилилось екологічне законодавство. Європейська реєстрація, оцінка, схвалення та обмеження хімічних речовин (REACH) та аналогічні ініціативи в інших країнах суворо регулюють звертання небезпечних хімікатів і стимулюють їх заміну безпечнішими аналогами [6]. Ці норми обмежують викиди летких органічних сполук (ЛОС) і встановлюють жорсткі вимоги до поводження з хімічними відходами, збільшуючи адміністративне навантаження та потенційні екологічні штрафи для підприємств.

По-третє, залишається гострою проблема утилізації небезпечних відходів, до яких належать і відпрацьовані розчинники. Їхнє спалювання або захоронення пов'язане зі значними витратами на логістику та екологічними платежами, а також веде до безповоротних втрат цінних матеріальних ресурсів. Це суперечить принципам циркулярної економіки.

У сукупності ці виклики створюють потрійний тиск на виробників ЛКМ: економічний (зростання витрат), нормативний (підвищені вимоги) та екологічний (відповідальність за відходи) [7]. Технологія регенерації розчинників пропонує комплексне вирішення цих проблем, перетворюючи витрати на утилізацію на додатковий джерело сировини, зменшуючи залежність від коливань цін на ринку та забезпечуючи дотримання суворих екологічних стандартів.

3. Значення ЛКМ (лакофарбових матеріалів) у промисловості та їх внесок в утворення летких органічних сполук (ЛОС)

Лакофарбові матеріали (ЛКМ) відіграють фундаментальну роль у сучасній промисловості, виконуючи не лише декоративну, але насамперед захисну функцію. Вони формують довговічні покриття на поверхнях металів, дерева, бетону та пластику, ефективно захищаючи їх від корозії, агресивних хімічних речовин, ультрафіолетового випромінювання та механічних пошкоджень. Застосування ЛКМ значно продовжує термін служби будівельних конструкцій, автомобілів, кораблів, промислового обладнання та побутової техніки, забезпечуючи економію матеріальних ресурсів і зменшуючи частку відходів. Таким чином, ЛКМ є невід'ємною ланкою в машинобудуванні, будівництві, суднобудуванні та інших ключових галузях економіки [8].

Однак традиційні технології нанесення та виробництва ЛКМ пов'язані з істотним екологічним навантаженням, зокрема, з утворенням летких органічних сполук (ЛОС). ЛОС – це органічні сполуки, які легко випаровуються при кімнатній температурі. В системах ЛКМ вони використовуються як розчинники для забезпечення необхідної в'язкості, зручності нанесення та формування якісного плівки. Під час висихання покриття, що відбувається переважно за рахунок випаровування цих

розчинників, вони в повному обсязі потрапляють в атмосферне повітря.

Ці викиди ЛОС мають серйозні негативні наслідки [9]. Вони є одними з основних забруднювачів атмосфери, що беруть участь у утворенні приземного озону (смогу) та фотохімічних окисників, які шкідливо впливають на здоров'я людини та екосистеми. Багато ЛОС також мають токсичні або навіть канцерогенні властивості. Через це питома вага ЛКМ-індустрії в загальноєвропейських викидах ЛОС є значною, що змушує вводити жорсткі законодавчі обмеження та стимулює пошук альтернативних технологій, серед яких регенерація та повторне використання розчинників є одним з найбільш практичних і ефективних рішень.

4. Необхідність зменшення ресурсозалежності виробництва та переходу до моделі циркулярної економіки

Сучасна лінійна модель економіки, заснована на принципі «видобути-виготовити-викинути», демонструє свою структурну неефективність у умовах обмеженості природних ресурсів. Виробництво лакофарбових матеріалів, будучи залежним від нафтохімічної сировини, вкрай уразливе до коливань ринкових цін та геополітичної нестабільності. Ця ресурсозалежність становить пряму загрозу економічній безпеці та конкурентоспроможності підприємств галузі. У відповідь на ці виклики світова економіка поступово переходить до моделі циркулярної економіки, спрямованої на створення замкнених виробничих циклів [10].

Циркулярна економіка ґрунтується на принципах максимального подовження життєвого циклу продуктів, матеріалів та ресурсів, мінімізуючи утворення відходів та втрати. У контексті виробництва ЛКМ це передбачає радикальну зміну підходу до поводження з відпрацьованими розчинниками. Замість того, щоб розглядати їх як небезпечні відходи, що потребують витратної утилізації, вони перетворюються на цінну вторинну сировину.

Технологія регенерації розчинників є практичним втіленням циркулярної економіки в ЛКМ-індустрії [11]. Вона дозволяє замикати матеріальний потік, трансформуючи лінійний процес («сировина → продукт → відхід») в циклічний («сировина → продукт → відхід → регенований ресурс → продукт»). Це безпосередньо сприяє зменшенню ресурсозалежності через скорочення обсягів споживання первинної сировини. Крім того, такий підхід генерує значні економічні вигоди, знижуючи операційні витрати на закупівлю розчинників та утилізацію відходів, а також зменшує екологічне навантаження на навколишнє середовище. Таким чином, регенерація розчинників є стратегічним кроком у побудові стійкої, ресурсо-ефективної та конкурентоздатної промисловості.

5. Джерела утворення та склад відпрацьованих розчинників у ЛКМ-виробництві

5.1. Основні джерела утворення відпрацьованих розчинників

Формування потоків відпрацьованих розчинників на підприємствах лакофарбової промисловості відбувається переважно за рахунок трьох ключових джерел, кожне з яких має специфічні характеристики та потенціал для подальшої регенерації.

1. *Промислові розчинники з ліній фарбування.* Це найбільш значущий за обсягом та найбільш регулярний джерельний потік. Технологічний процес нанесення лаків та фарб, особливо при пневматичному або безповітряному розпиленні, супроводжується значними втратами матеріалу у вигляді туману, що осідає на стінках камер, транспортерних системах та вентиляційному обладнанні. Для підтримки якості покриття та безперебійної роботи обладнання необхідно проводити його регулярне промивання. У результаті утворюються великі обсяги розчинників, забруднених пігментами, наповнювачами, смолами та іншими компонентами ЛКМ. Склад цих сумішей є найбільш складним і непростійним, що вимагає ефективних методів попередньої очистки перед безпосередньою регенерацією [12, 13].

2. *Відходи від чищення обладнання (змішувачів, ємностей, комунікацій).* Після завершення циклу виробництва партії ЛКМ технологічне обладнання – змішувальні апарати, реактори, зберігаючі ємності та трубопроводи – потребує ретельного очищення для запобігання перехресного забруднення продукції. Для цього також використовуються органічні розчинники. Цей джерельний потік, хоча і менш регулярний, ніж проми-

вні розчинники, може містити більш концентровані залишки конкретних матеріалів, що полегшує їх подальше розділення та очищення, особливо при налагодженій системі сортування відходів за типами вироблених ЛКМ [14].

3. *Некондиційні партії матеріалів.* В процесі виробництва через технологічні відхилення, помилки оператора або невідповідність якості сировини може бути вироблена партія ЛКМ, що не відповідає технічним специфікаціям. Такі некондиційні матеріали не можуть бути реалізовані споживачеві і часто підлягають утилізації [1]. Однак вони є потенційно цінним джерелом для регенерації, оскільки є готовою сумішшю розчинників та плівкоутворювачів з відносно стабільним і відомим складом. Регенерація таких партій дозволяє повернути в оборот як розчинну, так і тверду фазу, мінімізуючи економічні втрати.

Таким чином, система збору та подальшого поводження з цими трьома основними джерелами є фундаментом для економічно та екологічно доцільної організації процесу регенерації розчинників на підприємстві [15].

5.2. Характерний компонентний склад сумішей відпрацьованих розчинників

Відпрацьовані розчинники з виробництва лакофарбових матеріалів являють собою складні багатокомпонентні суміші, склад яких визначається технологією виробництва та типами використовуваних матеріалів. Для ефективної організації процесу регенерації необхідно чітко розуміти характеристики основних компонентів цих сумішей [16, 17].

Таблиця 1

Характеристики основних компонентів відпрацьованих розчинників

Клас сполук	Представники	Температура кипіння, °С	Густина, г/см ³	Показник заломлення	Вміст води, %	Кислотне число, мг КОН/г
Ароматичні вуглеводні	Толуол	110,6	0,87	1,496	≤ 0,03	≤ 0,01
	Ксилол	138-144	0,86	1,500	≤ 0,05	≤ 0,01
Аліфатичні вуглеводні	Уайт-спірит	155-202	0,79	1,441	≤ 0,02	≤ 0,05
Кетони	Ацетон	56,2	0,79	1,359	≤ 0,3	≤ 0,02
	Метилетилкетон	79,6	0,81	1,381	≤ 0,1	≤ 0,01
Спирти	Ізопропанол	82,4	0,79	1,377	≤ 0,2	≤ 0,02
	Н-бутанол	117,7	0,81	1,399	≤ 0,1	≤ 0,03
Складні ефіри	Етилацетат	77,1	0,90	1,372	≤ 0,1	≤ 0,01
	Бутилацетат	126,1	0,88	1,394	≤ 0,1	≤ 0,01
Високипллячі розчинники	Етилцелозольв	135,1	0,93	1,408	≤ 0,1	≤ 0,01

Таблиця 1 надає систематизований огляд фізико-хімічних характеристик основних класів органічних сполук, які найчастіше зустрічаються у складі відпра-

цьованих розчинників у виробництві лакофарбових матеріалів (ЛКМ). Вона структурована для наочності та порівняння, містить такі ключові параметри: представ-

ники кожного класу, температура кипіння ($^{\circ}\text{C}$), густина ($\text{г}/\text{см}^3$), показник заломлення, гранично допустимий вміст води (%) та кислотне число ($\text{мг КОН}/\text{г}$). Ці параметри є критично важливими для планування та оптимізації процесу регенерації, оскільки безпосередньо визначають вибір методу очищення (наприклад, дистиляції, адсорбції) та технологічні умови його проведення [16].

Аналізуючи дані таблиці 1, можна зробити низку важливих висновків щодо компонентного складу сумішей. По-перше, діапазон температур кипіння є дуже широким – від низькокиплячих сполук, як ацетон ($56,2^{\circ}\text{C}$) та метилетилкетон ($79,6^{\circ}\text{C}$), до висококиплячих, як уайт-спірит ($155-202^{\circ}\text{C}$) та етилцелозольв ($135,1^{\circ}\text{C}$). Це обумовлює необхідність використання різних методів дистиляції, зокрема вакуумної для термочутливих сполук. По-друге, такі параметри, як вміст води та кислотне число, які для більшості представників знаходяться на низькому рівні (наприклад, $\leq 0,03\%$ води для толуо-

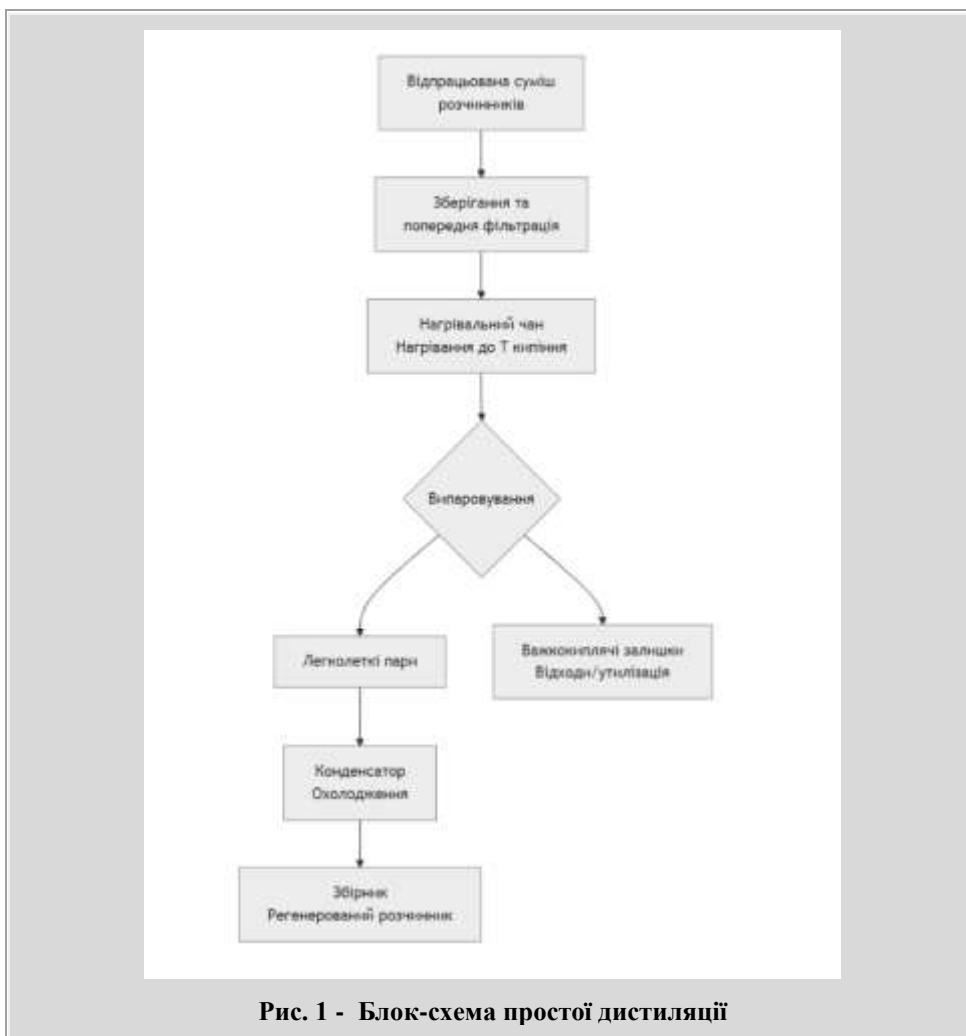
лу, $\leq 0,01$ мг КОН/г для ксилолу), вказують на потенційні домішки, що потребують видалення. Наприклад, підвищений вміст води у ацетоні (до $0,3\%$) або відносно високе кислотне число для н-бутанолу (до $0,03$ мг КОН/г) сигналізують про можливу потребу у зневодненні або нейтралізації.

6. Огляд методів регенерації розчинників

6.1. Дистиляційні методи регенерації розчинників

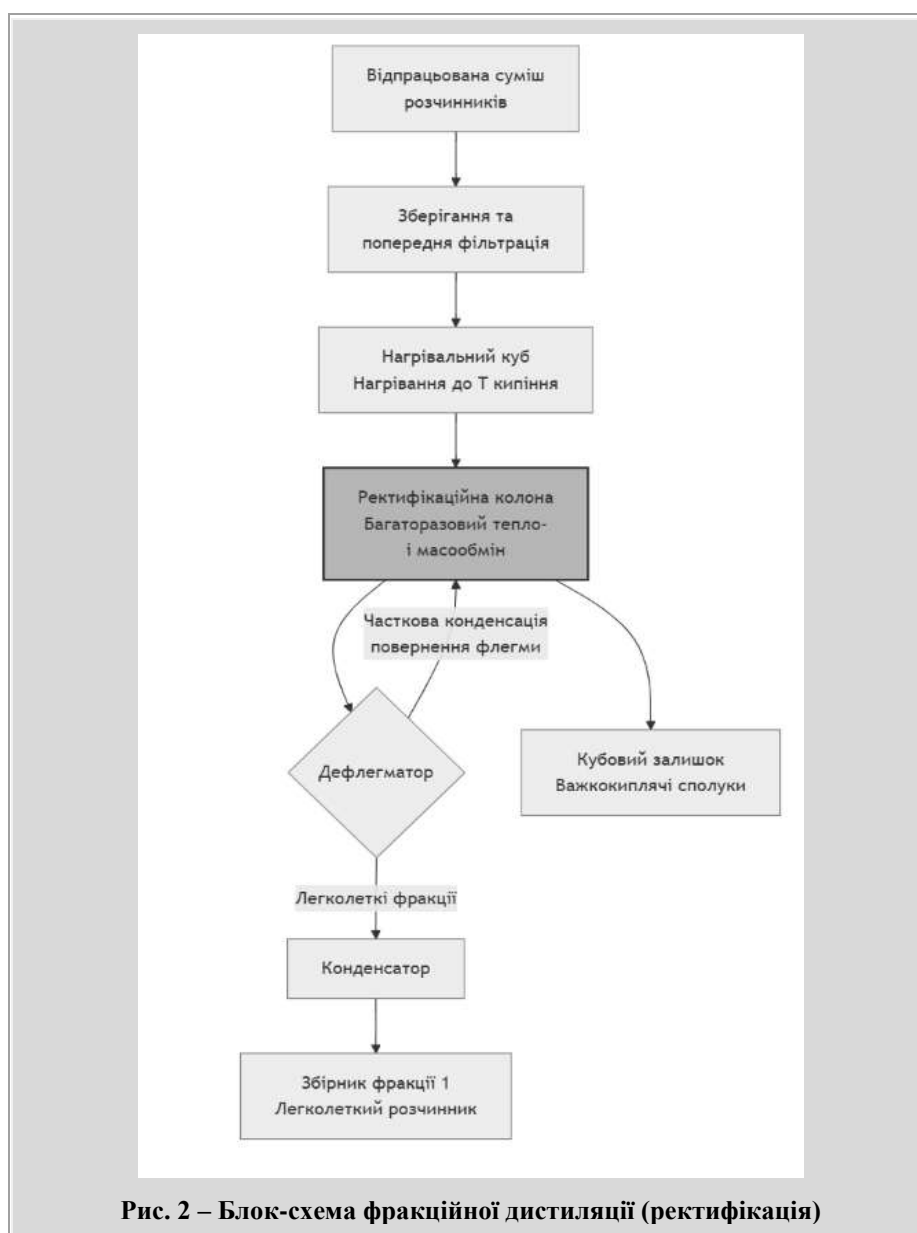
Дистиляційні методи є найбільш поширеними та ефективними способами регенерації відпрацьованих розчинників. Вони ґрунтуються на різниці в температурі кипіння компонентів суміші, що дозволяє розділити їх за допомогою випаровування та подальшої конденсації парів [18].

Проста дистиляція використовується для попереднього очищення сумішей або розділення компонентів з великою різницею в температурах кипіння (рис. 1).



Проста дистиляція - це базовий фізичний метод розділення рідких сумішей, заснований на різниці в температурі кипіння їхніх компонентів [19, 20]. Технологічний процес починається з завантаження відпрацьованої суміші розчинників у герметичну ємність (дистиляційний куб), де вона нагрівається. Під час нагрівання легколеткі компоненти з нижчою температурою кипіння випаровуються першими, тоді як важкокиплячі домішки (пігменти, смоли, олифи) залишаються в кубі у вигляді кубового залишку.

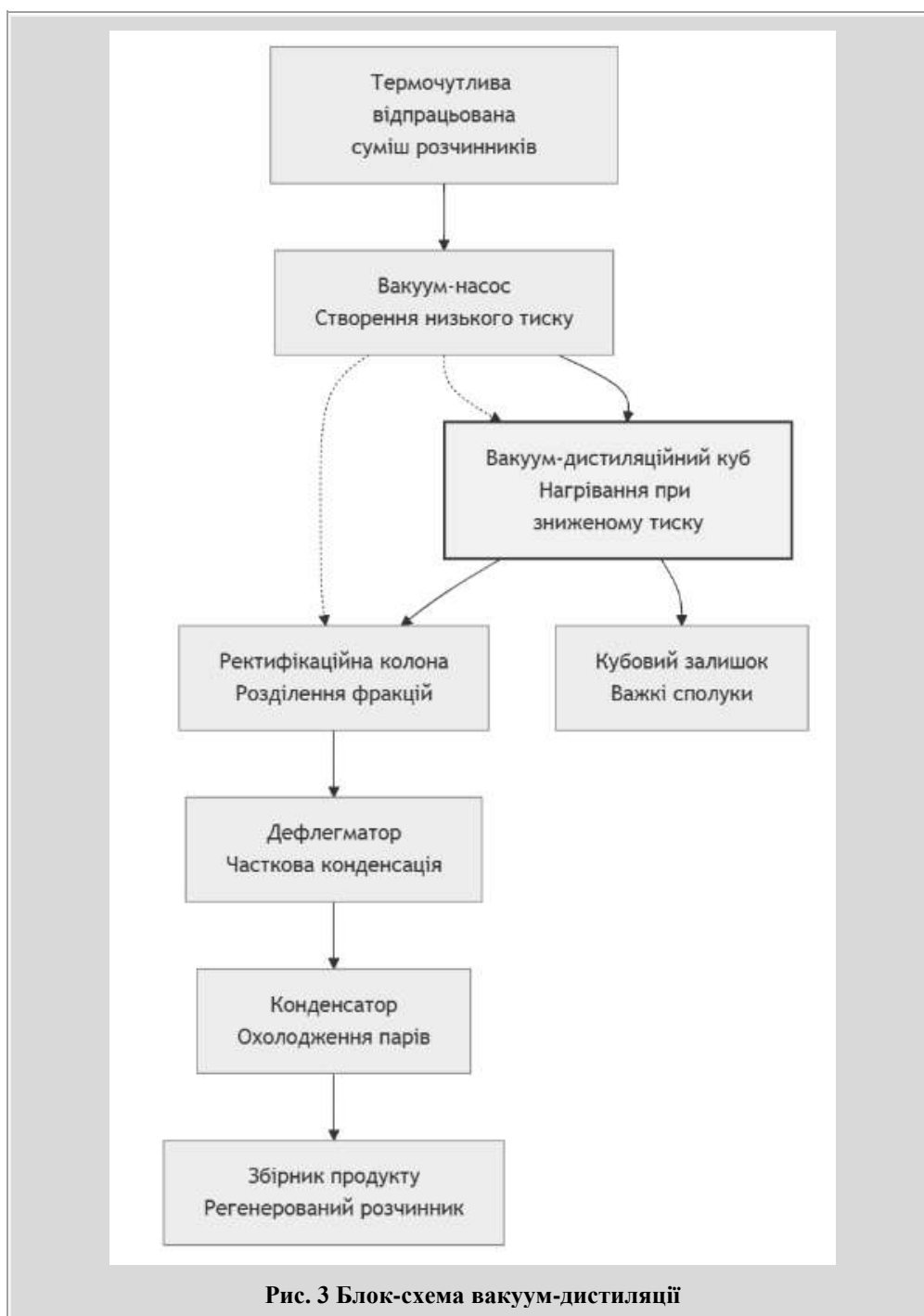
Утворені пари потім надходять у конденсатор, де охолоджуються і переходять назад у рідкий стан. Отриманий конденсат (дистилят) є очищеним розчинником, який збирається у спеціальній ємності. Цей метод є ефективним для попереднього концентрування розчинників або розділення сумішей з дуже великою різницею температур кипіння компонентів (понад 50–70°C). Незважаючи на низьку ефективність для складних сумішей, простота обладнання та низькі капітальні витрати роблять просту дистиляцію практичним рішенням для первинної стадії регенерації.



Фракційна дистиляція (ректифікація) є ключовим методом для регенерації складних багатокомпонентних сумішей розчинників (рис. 2).

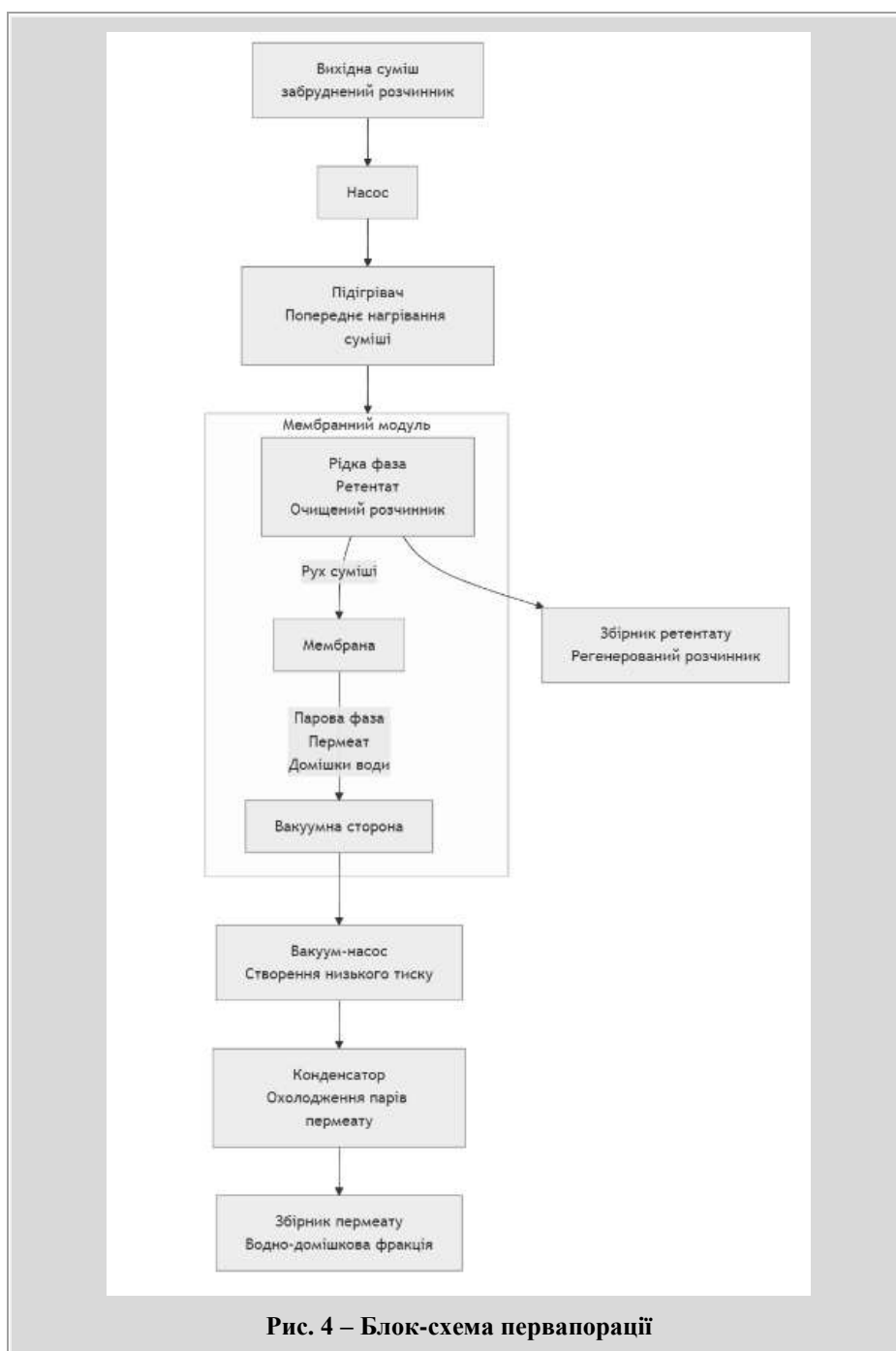
Фракційна дистиляція, або ректифікація, - це складний процес розділення багатокомпонентних рідких сумішей, що ґрунтується на багаторазовому

тепло- та масообміні між рідиною і паром. Відпрацьована суміш розчинників надходить у нагрівальний куб, де нагрівається до температури кипіння. Утворені пари піднімаються вгору по ректифікаційній колоні, обладнаній контактними пристроями (тарілками або насадкою).



На відміну від простої дистиляції, ключовим елементом тут є дефлегматор, який забезпечує часткову конденсацію парів і повернення частини рідини (флегми) назад у колону. Ця зворотна течія, рухаючись вниз назустріч парам, забезпечує інтенсивний тепло- і масообмін: легші компоненти переходять у парову фазу, а важчі конденсуються. В ре-

зультаті на різних висотах колони відбувається концентрування різних фракцій. Цей процес дозволяє розділити суміші з близькими температурами кипіння та отримати регеновані розчинники з чистотою до 99.9%, що робить ректифікацію найефективнішим методом для складних відпрацьованих сумішей у виробництві ЛКМ.



Вакуум-дистиляція застосовується для регенерації термочутливих сполук, які розкладаються або полімеризуються при високих температурах (рис. 3).

Зниження тиску в системі дозволяє значно знизити температуру кипіння компонентів. Наприклад, розчинник, що кипить при 180°C при атмосферному тиску, може кипіти при 100-120°C під вакуумом. Цей метод вимагає спеціального герметичного об-

ладнання та системи створення вакууму, але є незамінним для роботи з висококиплячими розчинниками (гліколеві ефіри, N-метилпіролідон) та сумішами, що містять компоненти з ризиком термічного розкладання [20].

Застосування дистиляційних методів дозволяє ефективно регенерувати широкий спектр розчинників із замкненням матеріальних потоків на підприємствах лакофарбової промисловості [21].

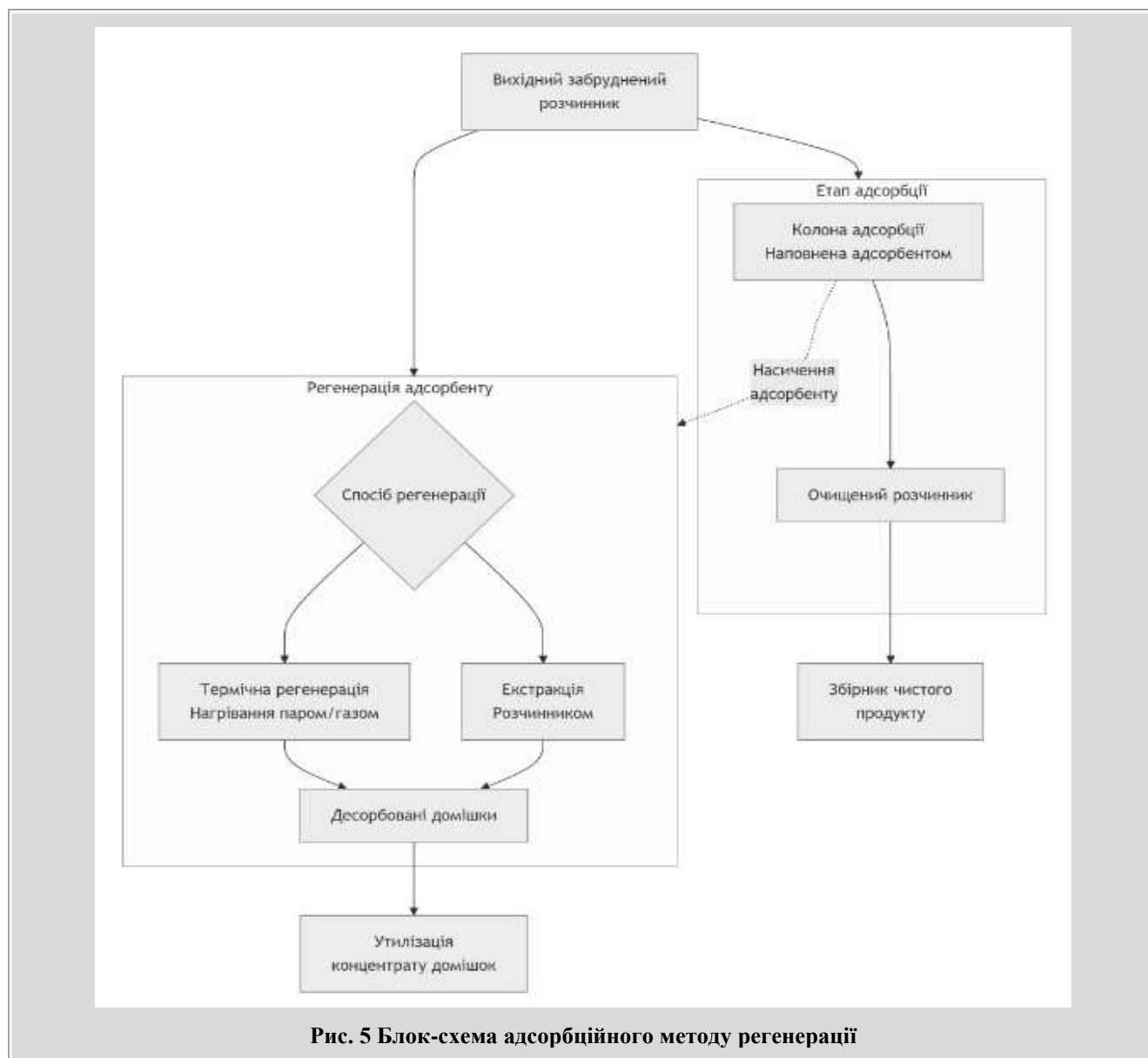


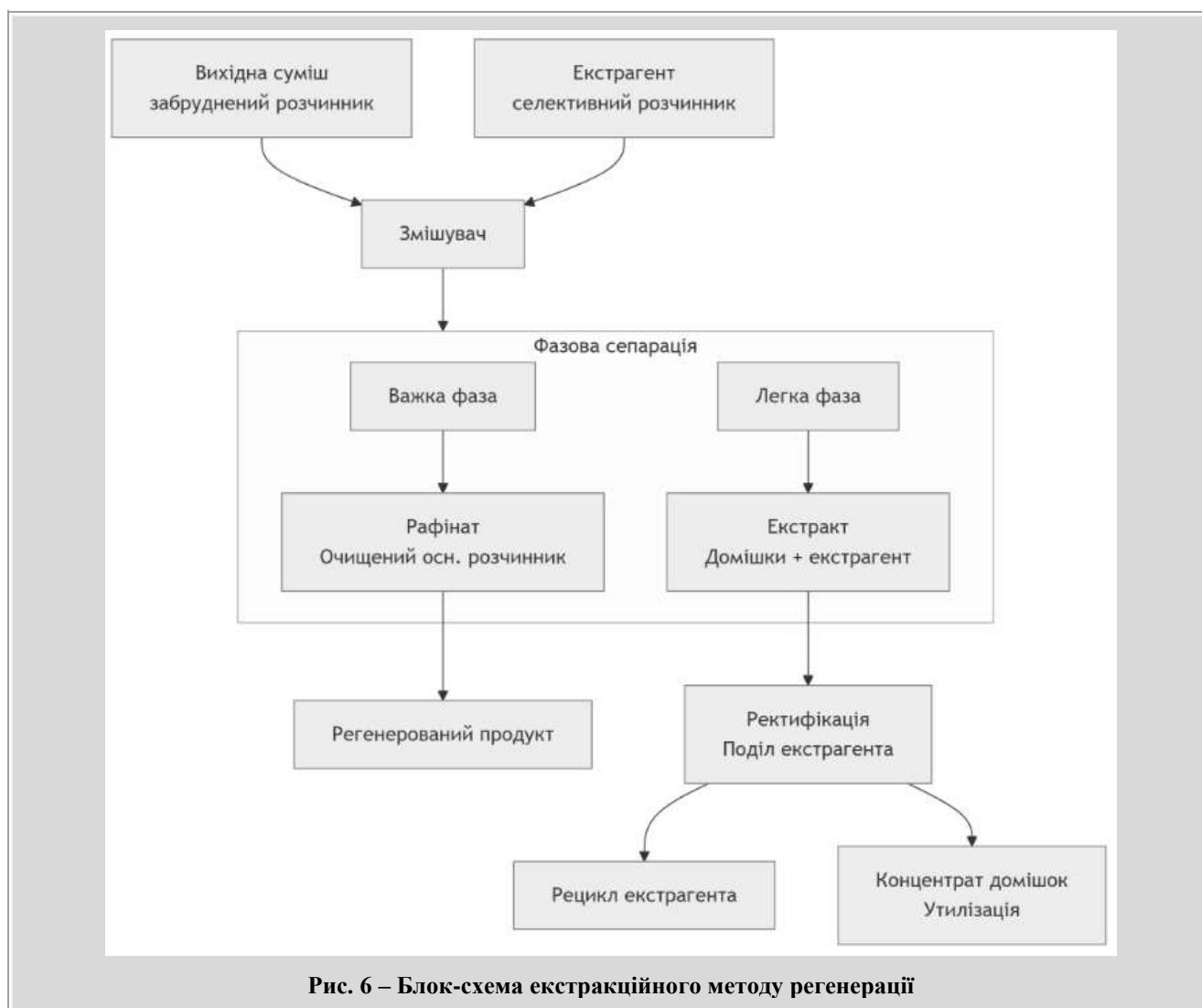
Рис. 5 Блок-схема адсорбційного методу регенерації

5.2. Мембранні методи регенерації розчинників
Мембранні методи, зокрема первапорація (рис. 4), становлять сучасний підхід до регенерації роз-

чинників, заснований на селективній проникності мембран різної природи [22]. Перапорація — це сучасний мембранний метод розділення рідких

сумішей, особливо ефективний для зневоднення органічних розчинників та поділу азеотропних сумішей, які важко розділити традиційною дистиляцією [23, 24]. Процес починається з подачі вихідної забрудненої суміші (наприклад, розчинника

з високим вмістом води) за допомогою насоса через підігрівач, де вона нагрівається до оптимальної температури для підвищення ефективності масообміну. Потім підготована суміш надходить у мембранний модуль, серце всієї системи.



Ключовим елементом модуля є селективна мембрана (полімерна, наприклад, з полівінілацетату, або неорганічна - цеолітна). Ця мембрана вибірково пропускає молекули певного типу (наприклад, води) значно швидше, ніж молекули основного розчинника. Фізико-хімічна основа процесу полягає в різниці у швидкостях сорбції, дифузії та десорбції компонентів у мембрані. З одного боку мембрани підтримується рідка фаза. Компоненти суміші розчинника сорбуються на поверхні мембрани, дифундують через її товщу і десорбуються з іншого боку у вигляді пари. Саме

тут відбувається розділення: молекули води, які мають більшу здатність проникати через мембрану, переходять у парову фазу. Для інтенсифікації цього процесу з іншого боку мембрани за допомогою вакуум-насоса створюється та підтримується низький тиск. Ця парова фаза, яка називається пермеатом і складається переважно з видалених домішок (води), відкачується вакуум-насосом і спрямовується в конденсатор. У конденсаторі пари охолоджуються і зріджуються, після чого рідкий пермеат збирається в окремій ємності для подальшої утилізації або обробки..

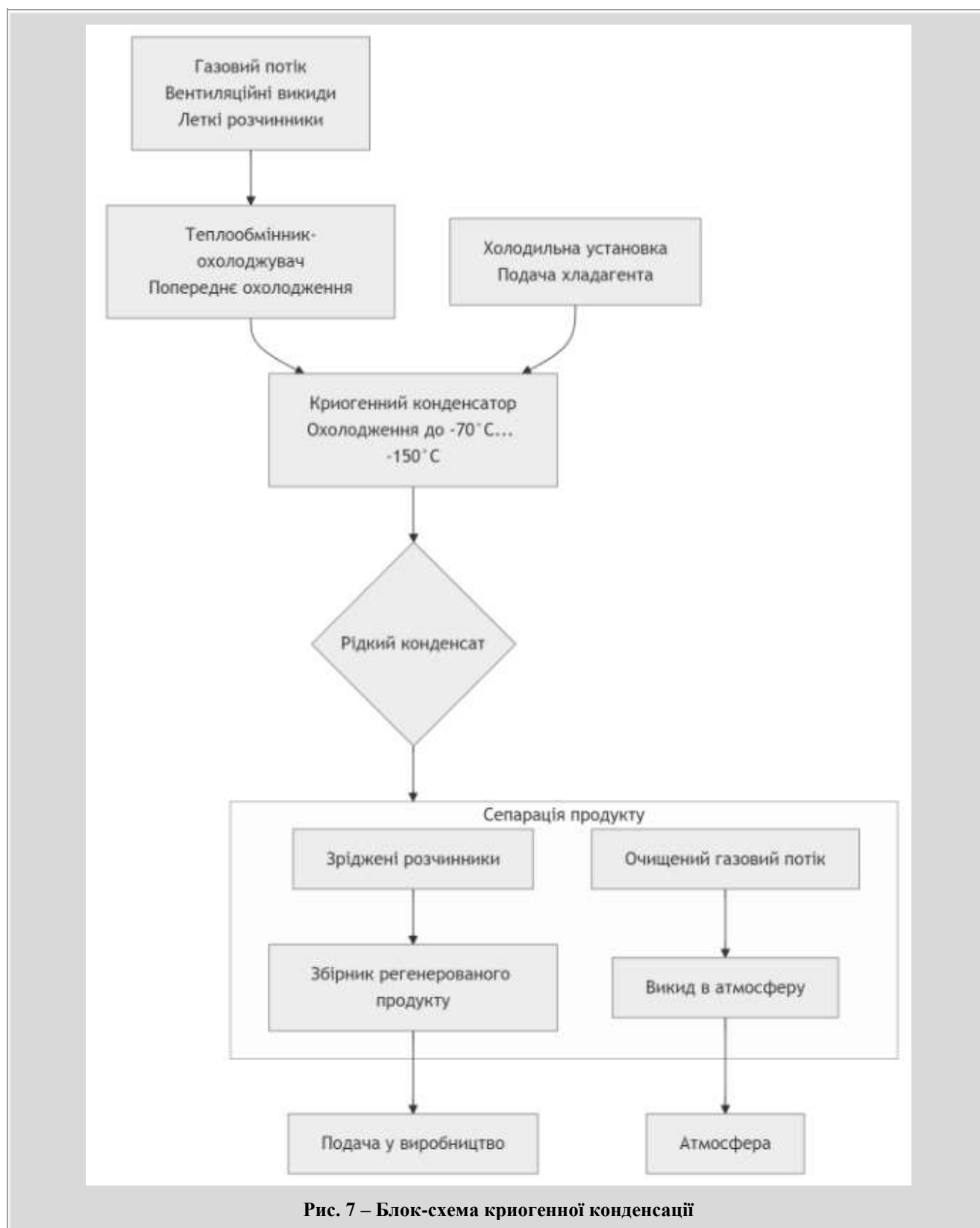


Рис. 7 – Блок-схема криогенної конденсації

Основний же потік (ретентат) це очищений розчинник, який не пройшов через мембрану і збирається у збірнику регенованого продукту.

Переваги первапорації включають високу енергоефективність (оскільки випаровується лише невелика частина суміші), можливість подолання азеотропії, компактність обладнання та екологічну безпеку. Вона ідеально підходить для фінішного зневоднення таких розчинників, як ізопропанол, етанол та ацетон, замикаючи матеріальні потоки у відповідності з принципами «зеленої» хімії та циркулярної економіки

6.3. Адсорбційні методи регенерації розчинників

Адсорбційні методи регенерації розчинників ґрунтуються на використанні пористих матеріалів з високою питомою поверхнею для видалення домішок шляхом фізичної адсорбції (рис. 5).

Адсорбційний метод регенерації розчинників - це фізико-хімічний процес очищення, заснований на здатності пористих матеріалів (адсорбентів) селективно поглинати домішки з рідкої фази [19, 25]. Цей метод особливо ефективний для видалення кольорових сполук, продуктів окислення, полімеризації та слідових кількостей кислот із відпрацьованих розчинників.

Основними адсорбентами є активоване вугілля та синтетичні цеоліти. [26]. Активоване вугілля має розвинену систему пор різного розміру (від мікропор до макропор) і ефективно поглинає широкий спектр органічних молекул. Цеоліти, будучи кристалічними алюмосилкатами зі строго визначеним розміром пор, працюють за принципом молекулярного сита, селективно видаляючи молекули певних розмірів і полярності, наприклад, воду.

Технологічний процес відбувається в колонних апаратах. Забруднений розчинник подається насосом у колону, заповнену гранульованим адсорбентом. Просочуючись крізь шар адсорбенту, розчинник звільняється від домішок, які затримуються на поверхні пор. Очищений продукт (ретентат) збирається в збірнику і може бути відразу використаний або спрямований на подальшу стадію очищення.

Коли адсорбційна ємність матеріалу виснажується, тобто він насичується домішками, необхідна його регенерація. Найпоширенішим методом є термічна регенерація, коли через шар насиченого адсорбенту пропускають гарячий інертний газ (наприклад, азот) або водяну пару. Підвищення температури призводить до десорбції - вивільнення домішок з пор. Альтернативою є екстракція розчинниками, яка використовується для певних типів забруднень.

Ефективність методу оцінюється за ступенем знебарвлення, зниженням кислотного числа та загальною чистотою продукту. Адсорбція є незамінною як фінішна стадія очищення після дистиляції, дозволяючи отримати розчинник високої якості, придатної для виробництва відповідальних продуктів, таких як автомобільні емалі. Її переваги - відносно низькі енерговитрати та можливість глибокого очищення, що робить її ключовим елементом сучасних гібридних технологій регенерації.

6.4. Інші та гібридні методи регенерації розчинників

Окрім основних методів регенерації, існують альтернативні та гібридні технології, що дозволяють ефективно вирішувати специфічні задачі очищення розчинників [27]. Екстракція (рис. 6) застосовується для видалення певних компонентів з використанням розподільних коефіцієнтів між двома нерозчинними рідкими фазами.

Екстракція - це метод регенерації розчинників, заснований на різниці розчинності компонентів суміші у двох взаємно нерозчинних рідких фазах. Він особливо ефективний для видалення кислот, лугів та полярних домішок з неполярних розчинників.

Процес починається з змішування вихідної забрудненої суміші з екстрагентом - спеціально підібраним розчинником, що має високу здатність вилучати цільові домішки. Після інтенсивного перемішування суміш надходить у відстійник, де відбувається розділення фаз через різницю в густині. Утворюються дві фази: рафінат (очищений основний розчинник) та екстракт (суміш домішок з екстрагентом). Рафінат спрямовується на подальше використання, а екстракт підлягає поділу, зазвичай методом ректифікації, для виділення та рециклу екстрагента. Концентрат домішок утилізується.

Перевагами методу є можливість селективного видалення специфічних домішок, ефективність для розділення полярних/неполярних систем та відносно низькі енерговитрати порівняно з дистиляцією [20]. Екстракція часто використовується в комбінації з іншими методами для підвищення загальної ефективності регенерації.

Криогенна конденсація використовує низькі температури для конденсації парів розчинників з газових потоків (рис. 7).

Криогенна конденсація - це метод уловлювання летких органічних сполук (ЛОС) з газових потоків шляхом їх охолодження до температур, при яких вони конденсуються в рідку фазу. Ця технологія особливо ефективна для рекуперації розчинників з

вентиляційних викидів виробництв лакофарбових матеріалів.

Процес починається з подачі забрудненого газового потоку в систему попереднього охолодження, де температура знижується до позитивних значень (наприклад, +5°C). Це дозволяє видалити значну частину водяної пари та підготувати газ до основного етапу. Далі потік надходить у *криогенний конденсатор* - теплообмінник, охолоджуваний спеціальною холодильною установкою.

Ключовим елементом системи є *хладагент* (рідкий азот, фреони або інші криогенні рідини), який циркулює через теплообмінник, охо-

лджуючи газовий потік до екстремально низьких температур (в діапазоні від -70 °C до -150 °C). При таких температурах пари розчинників досягають точки роси та конденсуються на поверхні теплообмінного апарату.

Отримана рідка суміш стікає в *сепаратор*, де відбувається розділення продуктів. Зріджені розчинники збираються в спеціальні ємності для подальшого використання або очищення. Очищений газовий потік, який вже містить мінімальну кількість ЛОС, виводиться в атмосферу через вентиляційну систему.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика методів регенерації розчинників

Метод	Ефективність	Енерговитрати	Капітальні вкладення	Придатність для типів розчинників
Проста дистиляція	Низька для складних сумішей, достатня для попереднього концентрування	Середні	Низькі	Розчинники з великою різницею температур кипіння, попереднє очищення
Ректифікація	Дуже висока, можливість отримання продукту 99,9% чистоти	Високі	Високі	Складні багатокомпонентні суміші, розчинники з близькими температурами кипіння
Вакуум-дистиляція	Висока для термочутливих сполук	Середні	Середні	Термочутливі розчинники, висококиплячі сполуки
Первапорація	Висока для зневоднення та розділення азеотропів	Низькі	Середні	Полярні розчинники, азеотропні суміші, зневоднення
Адсорбція	Висока для видалення специфічних домішок	Низькі	Низькі-середні	Видалення кольорових сполук, слідів кислот, продуктів окислення
Екстракція	Середня для селективного виділення компонентів	Середні	Середні	Розділення полярних/неполярних систем, видалення кислот/лугів
Криогенна конденсація	Висока для летких компонентів	Дуже високі	Високі	Уловлювання летких розчинників з газових потоків

Перевагами методу є висока ефективність (до 95-99%) для летких компонентів з низькою температурою кипіння, можливість роботи з низькими концентраціями ЛОС, відсутність вторинних відходів. Криогенна конденсація є незамінною для остаточної очистки газових потоків та замикання матеріальних потоків у відповідності з принципами циркулярної економіки.

Найбільший практичний потенціал мають *гібридні технології*, що поєднують переваги різних методів [28]. Типовим прикладом є комбінація попередньої адсорбції з подальшою ректифікацією, де адсорбційне попереднє очищення дозволяє видалити важкі домішки, кольорові сполуки та про-

дукти полімеризації, що значно підвищує ефективність і термін служби ректифікаційної колони. Іншою перспективною комбінацією є поєднання мембранних методів з дистиляцією, де первапорація може ефективно видаляти воду та легколеткі домішки перед фракційною дистиляцією. Також варто відзначити комбінацію екстракції з ректифікацією для розділення азеотропних сумішей, де екстрагент дозволяє подолати азеотропію і забезпечити ефективне розділення компонентів. Гібридні системи дозволяють досягти більш високих показників чистоти продукту, знизити енерговитрати та капітальні витрати в порівнянні з використанням окремих методів.

6.5. Порівняльний аналіз методів регенерації розчинників

Аналіз таблиці 2 демонструє, що вибір оптимального методу регенерації залежить від конкретних умов та вимог до якості продукту. Для складних сумішей найефективнішими є гібридні підходи, що поєднують переваги різних методів. Наприклад, комбінація адсорбції з ректифікацією дозволяє значно знизити енерговитрати та підвищити якість кінцевого продукту. Для зневоднення розчинників первапорація є більш енергоефективною альтернативою традиційній ректифікації. Криогенна конденсація хоча і має високі енерговитрати, залишається незамінною для уловлювання летких розчинників з вентиляційних викидів. Таким чином, оптимальна технологічна схема регенерації повинна враховувати специфічний склад відпрацьованих розчинників, вимоги до якості регенованого продукту та економічні фактори.

Висновки

1. Пошук та впровадження нових, більш ефективних методів регенерації розчинників є стратегічно важливим завданням для сучасної лакофарбової промисловості. Зростання вартості нафтохімічної сировини, посилення екологічних норм (зокрема REACH), а також глобальний перехід до моделі циркулярної економіки формують потужний економічний і нормативний тиск на виробників. Водночас, відпрацьовані розчинники, які раніше вважалися небезпечними відходами, нині розглядаються як цінний вторинний ресурс, здатний істотно зменшити ресурсозалежність виробництва та знизити екологічне навантаження.

2. Традиційні методи регенерації, такі як проста або фракційна дистиляція, хоча й залишаються ефективними, мають обмеження щодо енерговитрат, селективності та придатності для складних або азетропних сумішей. Це зумовлює необхідність пошуку інноваційних технологій – мембранних, адсорбційних, екстракційних і, особливо, гібридних методів, які поєднують переваги різних процесів. Такі підходи дозволяють досягати високої чистоти регенованих розчинників при мінімальних енерговитратах, забезпечують можливість зневоднення, селективного вилучення домішок і повного замикання матеріальних потоків.

Розробка та оптимізація нових методів регенерації розчинників є ключовим напрямом розвитку екологічно безпечного та економічно ефективного виробництва лакофарбових матеріалів. Вона сприяє впровадженню принципів «зеленої» хімії, зняттю обсягів утворення відходів, збереженню природних ресурсів і підвищенню конкурентоспро-

можності підприємств у рамках переходу до сталого розвитку.

Бібліографічний список

1. **Laura Pilon.** Development of a solvent sustainability guide for the paints and coatings industry / **Laura Pilon, Daniel Day, Harry Maslen, Oliver P. J. Stevens, Nicola Carslaw, David R. Shaw, Helen F. Sneddon** // *Green Chemistry*. – 2024. – Vol. 26. – Iss. 18. – P. 9697-9711. <https://doi.org/10.1039/d4gc01962h>.

2. **Guillot C.** Green Chemistry: Navigating Sustainable Pathways in Chemical Innovation / **C. Guillot** // *Trends in Green Chemistry*. – 2023. – Vol. 9. – Iss. 4. <https://doi.org/10.21767/2471-9889.10090>.

3. **Якубовський М.М.** Модернізація економіки промислових регіонів: спроба концептуалізації / **М.М. Якубовський, В.І. Ляшенко** // *Вісник економічної науки України*. – 2016. – № 1. – С. 188 – 195.

4. **Павленко І.І.** Оцінка потенціалу підвищення конкурентоспроможності підприємств хімічної промисловості / **І.І. Павленко** / *Теоретичні і практичні аспекти економіки та інтелектуальної власності* : зб. наук. праць : у 2-х вип. – *Маріуполь: ПДТУ*, 2015. – Вип. 2 (12). – Т. 3. – С. 8-13.

5. **Ruffino B.** Automotive paint sludge: Pretreatments and recovery options / **B. Ruffino, M.C. Zanetti, G. Genon** // *Resources*. – 2023. – Vol. 12. – Iss. 4. – 45. <https://doi.org/10.3390/resources12040045>.

6. *Final Report of the Study on Spent Solvents. United States Environmental Protection Agency. — Washington D.C.: EPA, 2025.* / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.epa.gov/hw/final-report-study-spent-solvents>.

7. **Ciaciuch A.** Recovery of the organic solvents from waste mixtures: separation optimisation / **A. Ciaciuch, M. Sulewski** // *Structure and Environment*. – 2024. – Vol. 16. – Iss. 2. – P. 111-121. <https://doi.org/10.30540/sae-2024-010>.

8. **Шевченко Т.О.** Використання рекупераційних технологій у виробництві ЛФМ / **Т.О. Шевченко** // *Наукові праці ОНПУ*. – 2019. – № 3 (65). – С. 115–120.

9. **Moura P.C.** Towards the identification of the volatile organic compounds emitted by coatings used in a car factory painting line / **P.C. Moura, F.Santos, C.Fujão, V.Vassilenko** // *Journal of Coating Technology and Research*. – 2024. – Vol. 21. – P. 665–682. <https://doi.org/10.1007/s11998-023-00847-7>.

10. **Перерва П.Г.** Антикризовий механізм санації та реструктуризації підприємств хімічної промисловості / **П.Г. Перерва, В.Л. Товажнянський** // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Технічний прогрес та ефективність виробництва. – 2013. – № 20. – С. 76–85.
11. **Brouwer T.** Bio-based solvents as entrainers for extractive distillation in aromatic/aliphatic and olefin/paraffin separation / **T. Brouwer, B. Schuur** // *Green Chemistry*. – 2020. – Vol. 22. – P. 5369-5375. <https://doi.org/10.1039/D0GC01769H>.
12. **Aboagye E.A.** 2021. Systems level roadmap for solvent recovery and reuse in industries / **E.A. Aboagye, J.D. Chea, K.M. Yenkie** // *iScience*– Vol. 24. – Iss. 10. – P. 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103114>.
13. **Hoffman, A.H.** Solvent Paint Waste Minimization and Recycling – A Case Study Torrance, CA : Major Paint Co., Pollution Prevention Case Studies, 1995. – 10 p. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://p2infohouse.org/ref/01/00606.pdf>.
14. **Setyawan, M.** Solvent Recovery from Industrial Paint Waste using Batch Distillation: The Effect of Temperature / **M. Setyawan, J. Jayanudin, Y. Maryani** // *ASEAN Journal for Science and Engineering in Materials*. – 2025 4. – Iss. 1. – P. 55-62.
15. **Jaime J.A.** Control of an Optimal Extractive Distillation Process with Mixed-Solvents as Separating Agent / **J.A. Jaime, G. Rodriguez, I. D. Gil** // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 2018. – Vol. 57(29). – P. 9615–9626.
16. **Kumar A.** A critical review on sustainable hazardous waste management: strategies, technologies and policy perspectives / **A. Kumar, P. Singh, R. Kumar [et al.]**. – *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2023 // [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10470149/>.
17. **Stockwell C.E.** Volatile organic compound emissions from solvent- and water-borne coatings – compositional differences and tracer compound identifications [Електронний ресурс] / **C.E. Stockwell, M.M. Coggon, G.I. Gkatzelis, J. Ortega, B.C. McDonald, J.B. Gilman, M. Trainer, C. Warneke** // *Atmospheric Chemistry & Physics*. – Vol. 21. – 2021. – P. 6005-6022. <https://doi.org/10.5194/acp-21-6005-2021>.
18. **Петухов, О.В.** Фізико-хімічні основи очищення та регенерації розчинників / **О.В. Петухов**. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 120 с.
19. **Черниш Л.В.** Регенерація розчинників методами дистиляції та адсорбції / **Л.В. Черниш** // *Хімічна промисловість України*. – 2021. – № 4. – С. 25–31.
20. **Yin C.** Optimization of Solvent and Extractive Distillation Sequence Considering Its Integration with Reactor / **C. Yin, G. Liu** // *Processes*. – 2021. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 565. <https://doi.org/10.3390/pr9030565>.
21. **Onyeji L.I.** Recovery and Analysis of Solvents from Waste in Paint Industry / **L.I. Onyeji, A.O. Odukwe, E.E. Anyanwu** / Awka : Department of Chemical Engineering, Nnamdi Azikiwe University, 2017. – 8 p. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/321018668_RECOVERY_AND_ANALYSIS_OF_SOLVENTS_FROM_WASTE_IN_PAINT_INDUSTRY.
22. **Srishti S.** A Review of Advancements in Solvent Recovery from Hazardous Waste — **S. Srishti, Aparna Anilkumar, Y. Roy** // *Journal of the Indian Institute of Science*. 2024. – Vol. 104. – P. 811-825.
23. **Tandel A.M.** Designing organic solvent separation membranes: polymers, porous structures, 2D materials, and their combinations / **A.M. Tandel, W. Guo, K. Bye, L. Huang, M. Galizia, H. Lin** // *Advances*. – 2021. – No 2. – P. 4574-4603.
24. **Vane L.M.** Review of pervaporation and vapor permeation process factors affecting the removal of water from industrial solvents / **L.M. Vane** // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. – 2019. – Vol. 95. – Iss. 3. – P. 495-512. <https://www.doi.org/10.1002/jctb.6264>
25. **Himanshu Patel.** Review on solvent desorption study from exhausted adsorbent / **Himanshu Patel** // *Journal of Saudi Chemical Society*. – 2021. – Vol. 25. – Iss. 8. – P. 10132. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101302>.
26. **Ruhl M.J.** Recover VOCs via adsorption on activated carbon / **M.J. Ruhl** // *Chemical Engineering Progress*. – 1993. – Vol. 89. – Iss. 7. – 6124569. <https://www.osti.gov/biblio/6124569>
27. **Srishti S.** A Review of Advancements in Solvent Recovery from Hazardous Waste / **S. Srishti, A. Anilkumar, Y. Roy** // *Journal of the Indian Institute of Science*. – 2025. – Vol. 104. – Iss. 7. – P. 811-825. <https://doi.org/10.1007/s41745-025-00466-8>.
28. **Zhang H.** Review of Hybrid Membrane Distillation Systems [Електронний ресурс] / **H. Zhang**. // *Membranes*. – 2024. – Vol. 14. – Iss. 1. – P. 25. <https://doi.org/10.3390/membranes14010025>.

Рукопис надійшов до редакції 30.09.2025

USE OF REGENERATED SOLVENTS IN THE PRODUCTION OF INDUSTRIAL ENAMELS AND PRIMERS© D.V. Miroshnychenko¹, S.L. Zharov², O.V. Kvasov³, D.K. Kuzin⁴, V.V. Marchenko⁵, S.A. Naboka⁶*National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute' (NTU 'KhPI'), 61002, Kharkiv, 2 Kirpichova Street, Ukraine*¹ Miroshnychenko Denis Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Prof., Head of the Department of Oil, Gas and Solid Fuel Processing Technology (DOGSFPT), e-mail: dvmir79@gmail.com² Zharov Serhii Leonidovich, Postgraduate Student of the DOGSFPT, e-mail: slzharov1977@gmail.com³ Kvasov Alexander Viktorovich, Postgraduate Student of the DOGSFPT, e-mail: 0099778@gmail.com⁴ Kuzin Dmitry Konstantinovich, Postgraduate Student of the DOGSFPT, e-mail: kuzin21061985@gmail.com⁵ Marchenko Viktor Vasylovych, Postgraduate Student of the DOGSFPT, e-mail: 0997727@gmail.com⁶ Naboka Serhiy Andriyovych, Postgraduate Student of the DOGSFPT, e-mail: naseanua@gmail.com

The aim of the work is to identify current trends in the paint and coatings industry in the context of the global sustainable development strategy and the implementation of green chemistry principles. Economic and environmental challenges are analysed, in particular the rising cost of raw materials, stricter environmental legislation requirements and problems related to the disposal of hazardous waste. The importance of paint and varnish materials in industry and their contribution to the formation of volatile organic compounds that affect the environment and human health are highlighted. In particular, it is shown that, taken together, the existing challenges create triple pressure on manufacturers of industrial paints and varnishes: economic (rising costs), regulatory (increased requirements) and environmental (responsibility for waste). It is noted that solvent regeneration technology offers a comprehensive solution to these problems, transforming disposal costs into an additional source of raw materials, reducing dependence on market price fluctuations and ensuring compliance with strict environmental standards.

The need to reduce the resource dependence of production and transition to the principles of a circular economy is emphasised. Particular attention is paid to the sources of formation and component composition of spent solvents in the production of paint and varnish materials. An overview of modern methods of solvent regeneration as key areas of greening and improving the efficiency of paint and varnish production is presented. The need to search for innovative technologies – membrane, adsorption, extraction and, especially, hybrid methods, which combine the advantages of different processes and allow achieving high purity of regenerated solvents with minimal energy consumption, provide the possibility of dehydration, selective removal of impurities and complete closure of material flows.

Keywords: paint and varnish materials, volatile organic compounds, waste solvents, regeneration, green chemistry, circular economy, sustainable development.

Corresponding author D.V. Miroshnychenko, e-mail: dvmir79@gmail.com

Manuscript received 2025/09/30

Запрошуємо до співробітництва

«Вуглехімічний журнал; Journal of Coal Chemistry» від заснування у 1993 р. був і досі лишається єдиним в Україні спеціалізованим науково-виробничим виданням, тематика котрого охоплює і популяризує наукові розробки та передовий виробничий досвід у вуглехімічній та коксохімічній галузях, аналіз і поширення закордонного досвіду та економічних знань у цій області, а також у царині хімічної технології палива та паливно-мастильних матеріалів.

Серійне видавництво «Вуглехімічного журналу» розпочалося 1998 р. Вже наступного року Постановою Вищої атестаційної комісії України № 1-05/7 від 09.06.99 «Про затвердження переліку № 1 наукових фахових видань, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт» його було включено до переліку за спеціальністю 05.17.07. Відтоді «Вуглехімічний журнал» не втрачав статусу фаховості й, попри всі ускладнення, продовжує виходити друком шість разів на рік.

Принципи, що на них базується робота «Вуглехімічного журналу», викладено на сторінці видання (<https://www.ukhin.org.ua/vuhlekhimichniy-zhurnal.html>). Зокрема, мета редакційної політики «Вуглехімічного журналу» – сприяти опублікуванню і поліпшенню можливостей для оприлюднення, поширення та пропагування результатів наукових та науково-виробничих досліджень серед науковців і практиків, привернути увагу до перспективних і актуальних проблем вуглехімії, коксохімії та суміжних галузей, посилити обмін думками між науковим співтовариством України і зарубіжних країн. Саме тому публікації у «Вуглехімічному журналі» є безкоштовними для авторів. І тому ж електронні версії журналу присутні у вільному доступі на платформі «Наукова періодика України» – щоправда, внаслідок специфічності фінансування, з затримкою на 24 місяці. А власне факт цільового фінансування виробничниками підтверджує зацікавленість підприємств галузі у інформації, що поширюється журналом.

Журнал представлений у міжнародних реферативних та наукометричних базах даних Google Scholar (статті, з 2010 р.), Index Copernicus (з 2016 р., <https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=45867>), Crossref Metadata Search (з 2018, префікс 10.31081/1681-309X), у вітчизняній базі даних «Наукова періодика України» в Національній бібліотеці України ім. В.І. Вернадського НАН України та використовується у навчальному процесі з відповідних спеціальностей у провідних технічних вишах.

Invitation to cooperation

Since its foundation (1993), the Journal of Coal Chemistry has been the only specialized scientific and industrial publication in Ukraine covering and promoting scientific developments and best practices in the coal and coke industries, analyzing and disseminating foreign experience and economic knowledge in this field, as well as in the field of chemical technology of fuels and lubricants.

Serial publishing of the Journal of Coal Chemistry began in 1998. The following year, by Resolution of the Higher Attestation Commission of Ukraine No. 1-05/7 of 09.06.99 'On Approval of the List No. 1 of Scientific Professional Publications in which the Results of Dissertation Works May Be Published', it was included in the list in the specialty 05. 17.07. Since then, the Journal of Coal Chemistry has not lost its professional status and, despite all the complications, continues to be published six times a year.

The principles that underpin the work of the Journal of Coal Chemistry are set out on the journal's website (<https://www.ukhin.org.ua/vuhlekhimichniy-zhurnal.html>). In particular, the goal of the editorial policy of the Journal of Coal Chemistry is to promote the publication and improve opportunities for the publication, dissemination and promotion of scientific and industrial research results among scientists and practitioners, draw attention to promising and urgent problems of coal chemistry, coke chemistry and related industries, and enhance the exchange of views between the scientific community of Ukraine and foreign countries. That is why publications in the Journal of Coal Chemistry are free of charge for authors. And that is why electronic versions of the journal are freely available on the Scientific Periodicals of Ukraine platform – albeit with a 24-month delay due to the specifics of funding. The fact of targeted funding by producers confirms the interest of industry enterprises in the information disseminated by the journal.

The journal is presented in the international abstract and scientometric databases Google Scholar (articles since 2010), Index Copernicus (since 2016, <https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=45867>), Crossref Metadata Search (since 2018, prefix 10.31081/1681-309X), in the national database 'Scientific Periodicals of Ukraine' in the Vernadsky National Library of Ukraine of the National Academy of Sciences of Ukraine and is used in the educational process in the relevant specialties in leading technical universities.



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 № 4 від 14.11.2025 р.

Відповідальний за випуск Чешко Ф.Ф.

Набір тексту та макет Званчук-Малік В.Г.

Ціна договірна

Підписано до друку 08.12.2025 р. Формат 60×84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Друк офсетний.

Облік.-видавн. арк. 6,73. Умовн. друк. арк. 7,44. Наклад 150 прим. Зам. № 25-71.

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