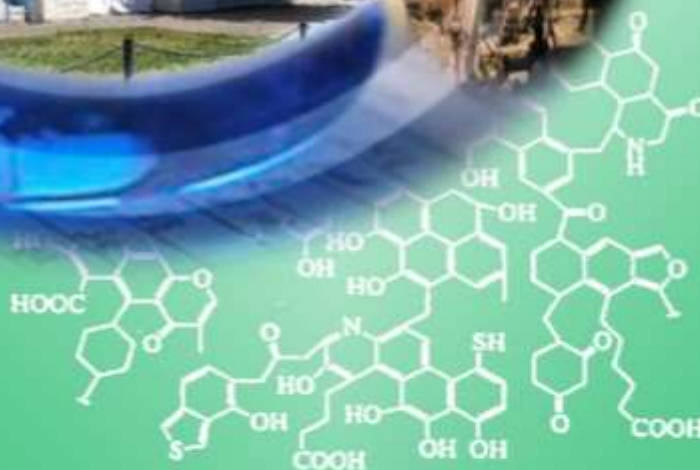




ISSN 1681-309X

ВуглеХімічний журнал



3 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), к.т.н., С.О.Кравченко (м. Харків)

Члени редколегії: д.т.н. Л.П. Банніков, (м. Харків), 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

3

Науково-виробничий
журнал

Виходить шість номерів
на рік

Заснований у вересні
1993 р

ЗАСНОВНИКИ:

Українська науково-
промислова
асоціація
«УКРКОКС»

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

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

При передруці матеріалів
посилання на журнал
обов'язкове.

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

Ціна договірна.

Зміст

стор.

Борисенко О.Л., Шульга І.В., Телешев Ю.В., Котляров Є.І. Використання супутніх смоло-оливних продуктів у складі вугільних шихт для коксування	3
Пиш'єв С.В., Липко Ю.В., Швед М.Є., Някевич М.В. Сорбенти на основі бурого вугілля та продуктів його переробки: огляд	12
Касімов О.М., Атаманюк О.А. Дослідження вуглепородних відвалів шахт північного Донбасу	20
Артищенко Б.К., Григоров А.Б. Дослідження впливу агресивних середовищ та хімічних реагентів на хімічностійкий композиційний матеріал	27

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-3-1-36

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



Journal of Coal Chemistry

3

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.

- Borysenko O.L., Shulga I.V., Teleshev Yu.V., Kotlyarov Ye.I.** Use of related resin-oil products in coal mixtures for coking 3
- Pyshyev S.V., Lypko Yu.V., Shved M.E., Nyvkevych M.V.** Sorbents based on brown coal and its pyshyev processing products: review 12
- Kasimov O.M., Atamanyuk O.A.** Research on coal waste heaps in mines in the northern Donbas region 20
- Artyshchenko B.K., Grigorov A.B.** Study of the effect of aggressive environments and chemical reagents on chemical-resistant composite materials 27

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-3-1-36

© SE «UKHIN», Journal of Coal Chemistry, 2025
ISSN 1681-309X

ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИХ СМОЛО-ОЛИВНИХ ПРОДУКТІВ У СКЛАДІ ВУГІЛЬНИХ ШИХТ ДЛЯ КОКСУВАННЯ© 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

У відповідності із сформульованими раніше основними принципами використання вторинних сировинних ресурсів у виробництві коксу виконані роботи з дослідно-промислового коксування вугільних шихт з додаванням смоло-оливних супутніх продуктів. В коксохімічному виробництві такими найбільш великотонажними продуктами є кам'яновугільні фуси, які утворюються в процесі завантаження шихти в камери коксування та виділяються згодом в механізованих освітлювачах відділення охолодження газу та конденсації смоли в цехах уловлювання хімічних продуктів коксування. Встановлено, що за введення до шихти від 1 до 10 % кам'яновугільних фусів подрібнюваність лабораторного коксу покращується на 0,3...4,6 %, а стиранність – на 0,2...1,3 %. Але при цьому і вихід коксу від шихти знижується на 0,9...3,3 %. Введення фусів дозволяє збільшити щільність насипної маси шихти, тому за невеликої кількості доданих фусів (1 %) зростає величина разового завантаження і вихід коксу з однієї камери. Однак в подальшому щільність насипної маси шихти збільшується повільніше, ніж знижується вихід коксу з шихти, і збільшення щільності насипної маси не компенсує зниження виходу коксу з камери – остання величина починає зменшуватись. Виходячи з цього, доза фусів, внесених до шихти, була визначена як 1 % - за максимумом виходу коксу з однієї камери. Це дозволяє повністю утилізувати фуси, що утворюються в значно меншій кількості – 0,04...0,06 % від маси шихти. Отримані в лабораторії результати були підтверджені під час дослідно-промислових коксувань: за введення в шихту 1 % фусів міцність коксу покращилась: за показником M_{25} на 0,2 %, а за M_{10} на 0,1 %. Аналогічним чином може використовуватись в шихтах і низка інших смоло-оливних супутніх продуктів, зокрема, смоли та оливи, що виділяються зі стічних вод коксохімічного виробництва, суміші кам'яновугільної смоли із шихтою, утворювані внаслідок ліквідації розливів у хімічних цехах, відходи від пропарювання газопроводів, шлам і нафталін від зачищення цистерн та хімічної апаратури.

Ключові слова: охорона довкілля, коксохімічне виробництво, коксування, вторинні сировинні ресурси, супутні продукти, фуси кам'яновугільні, подавання в шихту.

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

Раніше [1] нами була показана необхідність створення маловідходних технологій виробництва коксу шляхом повторного використання у складі вугільних шихт отримуваних вторинних продуктів коксування.

Метою дослідження є обґрунтування можливості повторного використання вторинних продуктів коксохімічного виробництва у складі вугільних шихт для коксування.

Завданням, що вирішується на даному етапі дослідження, є аналіз зміни основних показників виходу і якості коксу та розробка на цій основі рекомендацій щодо використання в складі вугільних шихт вторинних сировинних ресурсів, утворюваних за виробництва коксу.

Для проведення лабораторних коксувань на одному з провідних коксохімічних підприємств України були відібрані та доставлені до ДП «УХІН» представницькі проби вугільних концентратів, які входять до сировинної бази коксування цього підприємства.

В табл. 1 наведені дані технічного аналізу, пластометричні показники та результати дослідження вугілля в інтервалі його пластичності за методом Гізелера. Як видно з цих даних, вугільна шихта підприємства на час проведення досліджень мала міжбасейновий характер.

Більшість компонентів (7 з 10) – високосірчисте середньокарбоневе вугілля, типове для Донецького басейна, переважно середньої збагачуваності із помірною зольністю. В той же час в сировинній базі присутні компоненти А, В, J з інших басейнів – вугілля нижнього карбону, малосірчисте, але важко збагачуване, що зумовлює його дещо підвищену зольність. Єдиний виняток – природно малозольне вугілля відкритого видобутку (компонент J).

Таблиця 1

Технічний аналіз, пластометричні показники та дані з дослідження вугілля в інтервалі їх пластичності за методом Гізелера

Вугілля	Марка за постачальником	Технічний аналіз, %				Пластометрія, мм		Інтервал пластичності, °С, та плинність пластичної маси, °/хв, за Гізелером				
		A^d	S_t^d	V^d	V^{daf}	x	y	t_1	t_2	t_3	Δt	F_{max} , °/хв
А	Г	9,9	0,55	35,0	38,9	31	13	338	387	446	78	8430
В	ГЖ+К	9,5	0,79	32,7	36,1	30	15	328	375	420	92	12240
С	Г	7,4	2,03	32,1	34,6	43	13	362	405	435	73	3600
Д	Ж	8,5	2,09	30,9	33,7	35	15	352	426	465	113	1310
Е	Ж	8,7	2,16	28,8	31,5	30	18	356	445	483	127	$>5 \cdot 10^4$
F	К	9,4	1,13	25,3	27,9	17	10	410	446	473	63	200
G	К	8,5	1,17	24,5	26,8	21	13	362	421	450	88	630
Н	К	8,5	1,79	22,6	24,7	35	15	392	457	492	100	570
І	К+ПС	6,7	0,87	20,8	22,3	30	7	368	401	428	60	21
J	ПС	6,9	1,77	15,2	16,3	21	0	немає пластичності				

В табл. 2 надані результати петрографічного дослідження проб вугільних концентратів.

Наведені дані свідчать, що більшість компонентів шихти (8 з 10) є петрографічно однорідними – вміст вітриніту перевищує 80 %, а сума опіснювальних компонентів менша за 20 %. Винятками в цьому плані є вугілля С та І. Як негативний момент слід зазначити, що заявлена постачальниками марка вугілля далеко не завжди підтверджується даними петрографічного аналізу. В першу чергу це стосується добре спікливого вугілля марок Ж та К (компоненти D, F, G, H). У вугіллі В, марка якого заявлена постачальником як ГЖ+К, вміст вітриніту, що відповідає марці К, взагалі, за даними петрографічного аналізу, становить лише 3 %.

З цих компонентів була складена шихта, склад якої відповідав виробничій шихті. Характеристика складеної шихти наведена в табл. 3. З цих даних видно, що отримана шихта характеризується помірними значеннями зольності та виходу летких речовин, є петрографічно однорідною, з невеликим вмістом опіснювальних компонентів. Інтервал пластичності за Гізелером достатньо широкий, максимальна плинність за температури, яка досягається за 400 °С, коли термохімічні перетво-

рення вугілля сягають достатньої глибини, забезпечує потрібну для спікання рухливість утворюваних рідких продуктів.

Проте розподіл вітриніту за стадіями метаморфізму дещо відрізняється від оптимального [2]: незважаючи на те, що більшість складу шихти (59 %) становить добре спікливе вугілля марок Ж та К, однак вміст вітриніту, що відповідає основному коксоутворюючому компоненту – коксовому вугіллю – становить лише 9 %, що підтверджує наведені вище дані табл. 2. Внаслідок цього середній довільний показник відбиття вітриніту менший, аніж потрібно для отримання коксу високої якості [3] – лише 0,96 %. Через це і товщина пластичного шару є не дуже великою – лише 14 мм, що робить ефективним використання органічних домішок для поліпшення технологічних властивостей шихти та покращення якості коксу [4].

Серед таких домішок особливу увагу привертають ті, що утворюються в самому коксохімічному виробництві як вторинні сировинні ресурси – смоло-оливні супутні продукти. Найбільш великотонажними з них є кам'яновугільні фуси, що утворюються в процесі завантаження шихти до камер коксування і виділяються

згодом в механізованих освітлювачах відділення первинного охолодження газу та конденсації смоли в цехах уловлювання хімічних продуктів коксування. Тому до отриманої вміщуючої шихти додавали (понад 100 %)

фуси кам'яновугільні, характеристика яких подана в табл. 4. Властивості шихти із додаванням різної кількості фусів наведені в табл. 5.

Таблиця 2

Петрографічна характеристика вугільних концентратів (у %)

Вугілля	Петрографічний склад					Середній довольний показник відбивання вітриніту R^0 , %	Стадії метаморфізму вітриніту та умовно відповідні їм марки вугілля					
	вітриніт Vt	семівітриніт Sv	інертиніт I	ліптиніт L	сума опіснювальних компонентів ΣOK		ДГ (0,5-0,65)	Г (0,65-0,89)	Ж (0,9-1,19)	К (1,2-1,39)	ПС (1,4-1,69)	Т ($\geq 1,7$)
A	86	1	12	1	13	0,73	12	88	-	-	-	-
B	85	1	13	1	14	0,85	2	76	19	3	-	-
C	75	1	19	5	21	0,92	2	42	53	1	2	-
D	88	1	7	4	8	0,87	-	71	29	-	-	-
E	88	1	10	1	11	0,95	-	31	66	2	1	-
F	89	2	8	1	10	1,06	-	13	69	10	8	-
G	89	1	9	1	9	1,10	-	7	73	18	2	-
H	90	1	8	1	9	1,12	-	5	67	26	2	-
I	68	4	28	-	30	1,27	-	17	21	27	35	-
J	92	1	7	-	7	1,54	-	-	-	14	75	11

Як бачимо з цих даних, додавання фусів до складу шихти дещо підвищує її вологість, знижує зольність та сірчистість, збільшує вихід летких речовин, товщину пластичного шару та щільність сухої насипної маси шихти, визначену у відділі технічного контролю підприємства за методикою [5].

Зміна показників технічного аналізу в цілому відповідає різниці відповідних показників шихти та фусів. Додавання фусів збільшує товщину утвореного шихтою пластичного шару, що підтверджує їх ефективність як органічної добавки для підвищення спікливості шихти. Збільшення щільності насипної маси зумовлене змащуванням вугільних часточок смоляною частиною фусів, наслідком чого є зменшення коефіцієнту внутрішнього тертя в шихті та більш щільне пакування вугільних часток в шихтовій засипці.

Коксування дослідних шихт здійснювали в лабораторній печі конструкції ДП «УХІН» з електричним обігрівом та масою разового завантаження 5 кг [6]. Реторту з дослідною шихтою встановлювали в електропечі, попередньо розігрітій до 1100 °С. Період коксування становив 3 години, протягом яких температура в центрі вугільного завантаження сягала 950 °С. Після цього реторту вилучали з печі. Гасіння коксу здійснювали сухим безконтактним способом – шляхом охоло-

дження коксу в реторті крізь стінку без доступу повітря.

Вихід та показники якості отриманого коксу наведені в табл. 6.

Як видно з наведених даних, отриманий кокс характеризується належною готовністю – вихід летких речовин з його сухої незолоної (горючої) маси знаходиться на рівні 0,3...0,4 %. Вихід валового коксу від шихти зі зростанням частки доданих фусів закономірно знижується через зростання виходу летких речовин від шихти. Одночасно з цим зменшується і зольність коксу згідно зі зменшенням аналогічного показника за додавання фусів до шихти. Внаслідок цього коефіцієнт озолена знаходиться на достатньо стабільному рівні – 1,34...1,36. Сірчистість коксу, отриманого із шихти з додаванням фусів, також знижується через меншу сірчистість фусів у порівнянні із шихтою. Це забезпечує сталий коефіцієнт знесірчення (залишкової сірки) $\approx 0,8$.

Збільшення частки фусів у шихті в цілому призводить до поліпшення механічної міцності коксу. Так, показник опору подрібнювальним навантаженням P_{25} за збільшення частки доданих фусів монотонно збільшувався на 0,5...2,6 %. Це підтверджує ефективність використання фусів як органічної добавки для поліпшення якості коксу. Аналогічно, за кількості доданих

фусів до 5 % включно поліпшується (зменшується) і стиранність коксу на 0,1...0,7 %. В той же час зростання кількості доданих фусів від 5 до 10 % призводить до погіршення (збільшення) стиранності отриманого коксу на 0,4 %. Це можна пояснити за аналогією з т.зв. «переожирненням» шихти, коли кількість утворених рідкорухливих продуктів стає занадто великою по відно-

шенню до величини змочуваної ними поверхні. Внаслідок цього із жирного вугілля (або із шихти з його занадто великою кількістю) отримують крупний кокс (що навіть після його руйнування в барабані за визначення механічної міцності дозволяє отримати високий показник P_{25}) з великою стиранністю [7].

Таблиця 3

Характеристика вміщуючої шихти

Показники	Одиниці виміру	Числові значення
Компонентний склад:	%	
вугілля В		20
вугілля С		15
вугілля Е		29
вугілля F		14
вугілля Н		16
вугілля J		6
Технічний аналіз:	%	
зольність сухої маси A^d		7,6
вихід летких речовин із сухої маси V^d		26,7
вихід летких речовин із сухої незолоної (горючої) маси V^{daf}		28,9
сірчистість загальна сухої маси S_t^d		1,66
Пластометричні показники:	мм	
пластометрична усадка x		31
товщина пластичного шару y		14
Петрографічний склад	%	
вітриніт Vt		82
семівітриніт Sv		1
інертиніт I		10
ліптиніт L		7
сума опіснювальних компонентів ΣOK		11
Середній довільний показник відбитку вітриніту $\langle R^0 \rangle$	%	0,96
Вміст стадій метаморфізму вітриніту, що умовно відповідають маркам вугілля:	%	
ДГ (0,5-0,65 %)		1
Г (0,65-0,89 %)		32
Ж (0,9-1,19 %)		50
К (1,2-1,39 %)		9
ПС (1,4-1,69 %)		7
П ($\geq 1,7$ %)		1
Характеристика інтервалу пластичності за Гізелером:	°C	
початок інтервалу пластичності t_1		343
температура максимальної плинності t_2		400
завершення інтервалу пластичності t_3		434
ширина інтервалу пластичності Δt		91
Максимальна плинність пластичної маси	$^{\circ}/\text{хв}$	17610

Таблиця 4

Характеристика фусів кам'яновугільних у %

Показники	Числові значення
Технічний аналіз:	
Робоча вологість W_t	12,0
Зольність сухої маси A^d	4,2
Сірчистість загальна сухої маси S_t^d	0,51
Вихід летких речовин із сухої знезоленої (горючої) маси V^{daf}	39,6
Елементний склад сухої знезоленої (горючої) маси:	
Вуглець C^{daf}	94,03
Водень H^{daf}	3,95
Азот N^{daf}	0,89
Сірка S^{daf}	0,53
Кисень (за різницею) O^{daf}_d	0,60

Таблиця 5

Властивості шихти із додаванням фусів

Показники	Одиниці виміру	Числові значення за вмісту фусів у шихті (% понад 100 %)					
		0	1	2	3	5	10
Технічний аналіз	%						
Робоча вологість W_t		9,0	9,0	9,1	9,1	9,2	9,3
Зольність сухої маси A^d		7,6	7,6	7,5	7,5	7,4	7,3
Сірчистість загальна сухої маси S_t^d		1,66	1,64	1,64	1,63	1,60	1,54
Вихід летких речовин із сухої знезоленої (горючої) маси V^{daf}		28,9	29,0	29,1	29,2	29,2	30,0
Товщина пластичного шару y	мм	14	14	14	15	15	16
Насипна щільність сухої маси шихти γ^d	кг/м ³	723	729	734	738	751	779

Таблиця 6

Вихід та показники якості отриманого лабораторного коксу в %

Вміст фусів у шихті (понад 100 %)	Вихід коксу валового	Технічний аналіз			Коефіцієнти		Механічна міцність	
		A^d	S_t^d	V^{daf}	озолення K_o	знесірчення $K_{зс}$	Π_{25}	I_{10}
0	74,38	10,2	1,33	0,4	1,34	0,801	88,4	6,5
1	74,35	10,2	1,31	0,3	1,34	0,799	88,9	6,4
2	74,31	10,1	1,31	0,4	1,35	0,799	89,3	6,2
3	74,27	10,1	1,30	0,4	1,35	0,797	89,8	6,1
5	74,09	9,9	1,28	0,4	1,34	0,800	90,7	5,8
10	73,61	9,9	1,25	0,3	1,36	0,799	91,0	6,3

В цілому отримані результати лабораторних досліджень підтвердили ефективність використання фусів як органічної добавки у виробництві коксу і дозволили, таким чином, перейти до дослідно-промислових робіт. При цьому враховували, що введення фусів дозволяє

збільшити щільність насипної маси шихти, тому за невеликої кількості доданих фусів (1 %) зростає величина разового завантаження шихти і вихід коксу з однієї камери. Однак в подальшому густина насипної маси шихти збільшується повільніше, ніж знижується вихід

коксу від шихти, і збільшення щільності насипної маси не компенсує зниження виходу коксу з камери – ця величина починає зменшуватись. Тому масу доданих фусів, виходячи з їх кількості, отриманої за коксування, прийняли на рівні 1 %, що дозволяє повністю утилізувати їх у складі вугільних шихт.

Для дослідно-промислових робіт була розроблена спеціальна шихта, надійно забезпечена ресурсами вугільної сировинної бази підприємства на період проведення експериментів. Цей склад дослідної вугільної шихти наведений в табл. 7.

Таблиця 7

Склад шихти для проведення дослідно-промислових робіт

Вугілля	К	L	D	E	H	M	N
Марка	Г	ГЖО	Ж	Ж	К	К	КС+ПС
Вміст, %	30	6	6	25	16	12	5

Як бачимо, склад шихт на цьому етапі суттєво відрізняється від тих, які були використані під час проведення лабораторних досліджень. Шихта, як і раніше, є міжбасейною, однак в ній відсутня низка використаних раніше компонентів (зокрема, вугілля А, В, С, F, G, I, J). Натомість до шихти введені нові компоненти – вугілля К, L, M, N. В цілому розроблена шихта є достатньо збалансованою за своїм марочним складом. Вміст добре спікливого вугілля марок Ж та К складає 59 %, що має забезпечити потрібну спікливість – необхідну умову отримання якісного коксу [2, 3].

Програма проведення дослідно-промислових робіт передбачала отримання коксу із вміщуючої шихти на-

веденого складу та з додаванням до неї (понад 100 %) фусів кам'яновугільних у кількості 1 %. Для проведення робіт була обрана коксова батарея, яка мала найкращий технічний стан серед батарей другого блоку підприємства. При підготовці експериментальних робіт на відповідній вугільній башті була спеціально зачищена від залишків шихти виділена кишеня, до якої потім і завантажувалась дослідна вугільна шихта з добавкою.

При приготуванні шихти у вуглепідготовчому цеху відбирали проби вугільних концентратів з силосів дозувального відділення. Результати аналізу проб наведені в табл. 8.

Таблиця 8

Результати аналізу вугільних концентратів

Вугілля	Марка	Силос	Технічний аналіз, %				Товщина пластичного шару Y, мм
			W_t	A^d	S_t^d	V_{daf}	
M	К	2	10,2	10,2	1,02	28,0	12
N	КС+ПС	6	8,0	9,1	0,30	20,5	10
К	Г	7	10,0	7,6	1,70	36,5	12
L	ГЖО	8	7,0	9,3	1,10	33,1	13
D	Ж	9	8,9	7,7	2,60	33,9	18
H	К	10	10,5	7,2	2,13	21,1	17
E	Ж	12	11,4	8,2	2,25	30,9	24

Наведені результати свідчать про те, що в цілому вугільні концентрати виявляють характерний для себе комплекс властивостей. Тим не менш звертає на себе увагу підвищена зольність концентратів L, M, N. Окрім цього, у відібраній пробі вугілля Н одночасно відзначені знижені сірчистість та товщина пластичного шару, що дозволяє припустити засмічення даного концентрату вугіллям М.

Фуси до шихти подавали крізь спеціально споруджений бункер над конвеєром У-10, яким шихта надходить до відділення остаточного подрібнення та усереднення, а згодом – на вугільну башту. Стінки бункера обігриваються глухою парою. В нижній частині бункера розташований шнек-дозатор, за допомогою якого і здійснюється безпосередня подача фусів до шихти.

Під час проведення досліджень відбирали представницькі проби вміщуючої шихти та шихти з добавкою. Результати дослідження технологічних властивостей цих проб наведені в табл. 9.

З наведених даних видно, що додавання фусів кам'яновугільних в кількості 1 % (понад 1 %) не призводить до суттєвої зміни властивостей шихти. Вологість повітряно-сухої проби зросла на 0,1 %, загальна сірчистість сухої маси зменшилась на 0,02 %, вихід легких речовин (на суху та горючу масу) зріс на 0,1 %. На 1 мм зросла величина пластометричної усадки та на 1 відн. од. – спіклива здатність за Рога. Решта показників залишилась без змін.

Як дослідні при проведенні експериментів на кожному виді шихти були обрані печі однієї серії, без де-

фектів кладки та суттєвих особливостей завантаження та обігріву: № № 625, 615, 605 (за коксування вміщуючої шихти) та № № 629, 619, 609 (за коксування шихти з добавкою). Після завантаження була виміряна висота підклепінневого простору під завантажувальними

люками на шихту, а наприкінці періоду коксування безпосередньо перед видачею – ця ж величина на кокс. Середні дані про величину підклепінневого простору наведені в табл. 10.

Таблиця 9

Результати дослідження технологічних властивостей дослідних шихт

Шихта	Технічний аналіз, %					Пластометричні показники, мм		Співлива здатність за Рога
	W^a	A^d	S_t^d	V^d	V^{daf}	x	y	
Вміщуюча	0,9	8,0	1,74	27,7	30,1	30	16	62
З добавкою	1,0	8,0	1,72	27,8	30,2	31	16	63

З наведених даних видно, що висота підклепінневого простору помітно перевищує рівень 250...350 мм на шихту, визначений п. 10.22 ПТЕ-2017 [8]. Це зумовлено значним фізичним зносом камер коксування, які на час проведення робіт експлуатувались більш ніж

вдвічі довше проектного терміну. Це не дозволяє збільшувати величину разового завантаження шихти в камеру та призводить до підвищеної висоти підклепінневого простору.

Таблиця 10

Середня висота підклепінневого простору, мм

Умови виміру	Числові значення			
	Машинний бік	Середина	Коксовий бік	Середнє
На шихту	600	700	883	728
На кокс	750	750	967	822
Усадка	150	50	84	95

З наведених даних видно, що висота підклепінневого простору помітно перевищує рівень 250-350 мм на шихту, визначений п. 10.22 ПТЕ-2017 [8], що зумовлено значним фізичним зносом камер коксування, які на час проведення робіт експлуатувались більш ніж вдвічі довше проектного терміну. Це не дозволяє збільшувати величину разового завантаження шихти в камеру та призводить до підвищеної висоти підклепінневого простору. Слід також зазначити недостатню усадку шихти, хоча, як вказано вище, добавка фусів призво-

дить до зростання пластометричної усадки. Це свідчить про необхідність розробки спеціального температурного режиму коксування для печей, що експлуатуються понад проектний термін.

Основні показники технологічного режиму коксування під час проведення робіт наведені в табл. 11. Наведені дані свідчать, що в цілому технологічний режим коксування відповідає вимогам правил технічної експлуатації [8].

Таблиця 11

Основні показники технологічного режиму коксування

Показники	Одиниці виміру	Числові значення
Період коксування	годин-хвилин	20-37
Температура в контрольних вертикалах:	°С	
Машинний бік		1178
Коксовий бік		1214

Перед видачею коксу з дослідних печей коксові рампки, призначені для вивантаження дослідного коксу, були зачищені від залишків виробничого коксу. Отриманий дослідний кокс був виданий із зазначених вище камер коксування, погашений мокрим способом, вивантажений на рампу, витриманий там, відсортований за прийнятою на підприємстві схемою та відвантажений в залізничні піввагони. Виконання цих заходів дозволило

за відвантаження відібрати представницькі проби дослідного коксу.

Отримані проби були оброблені в коксопробних за прийнятими на підприємстві стандартними методиками з визначенням показників технічного аналізу, ситового складу та механічної міцності коксу. Ці дані наведені в табл. 12.

Таблиця 12

Характеристика отриманого коксу

Шихта	Ситовий склад, %		Механічна міцність, %		Технічний аналіз, %				Коефіцієнти	
	+80 мм	-25 мм	M ₂₅	M ₁₀	W ^a	A ^d	S ^d _t	V ^{daf}	K _o	K _{зс}
Вміщуюча	14,9	2,6	87,6	8,1	0,5	11,1	1,53	1,0	1,39	0,88
3 фусами	15,0	2,5	87,8	8,0	0,6	11,1	1,51	0,9	1,39	0,878

Наведені дані свідчать, що додавання фусів кам'яновугільних до виробничої шихти коксохімічного підприємства в кількості 1 % (понад 100 %) практично не змінює властивості отриманого коксу. В той же час простежуються тенденції до деякого поліпшення низки показників. Зокрема, показник опору коксу подрібнювальним зусиллям M₂₅ поліпшився (збільшився) на 0,2 %. Також дещо поліпшилась (зменшилась) стиранність коксу за показником M₁₀ – на 0,1 %.

Додавання до шихти фусів кам'яновугільних є не лише екологічним, але й економічно доцільним заходом. Економічний ефект визначається заміщенням частини дороговартісного коксівного вугілля фусами, які оцінюються на досить низькому рівні (т.зв. «тверда оцінка»). Величину економічного ефекту E в грн пропонується визначати за наступною формулою:

$$E = O_{\phi} \cdot (C_{\phi} - T_{\phi}) - \Delta BK \cdot C_{\text{вк}} \quad (1)$$

де O_{ϕ} – обсяг (кількість) фусів кам'яновугільних, що додаються до шихти, т; C_{ϕ} – собівартість вугільної шихти, грн/т сухої маси; T_{ϕ} – т.зв. «тверда оцінка» фусів кам'яновугільних, грн/т робочої маси; ΔBK – зміна обсягів виробництва валового коксу до та після заміщення шихти фусами кам'яновугільними, т сухої маси; $C_{\text{вк}}$ – середньозважена ціна 1 т валового коксу, грн/т сухої маси.

Як свідчать дані табл. 9, зміна виходу валового коксу та, відповідно, величина ΔBK , є несуттєвою (вихід легких речовин з горючої маси шихти внаслідок додавання фусів кам'яновугільних змінюється лише на 0,1 % – з 27,7 до 27,8 %). Тобто, можна очікувати, що за обмеженого додавання фусів кам'яновугільних до шихти економічний ефект буде позитивним. Але, за суттєво більшого обсягу утилізації фусів кам'яновугільних, або за утилізації фусів зі значно більшим значенням виходу легких речовин (тобто за погіршення умов очищення газу від смоли у відділенні конденсації), можлива ситуація, коли запропонований підхід буде економічно недоцільним.

Дані щодо собівартості шихти, твердої оцінки фусів кам'яновугільних та цін окремих фракцій валового коксу є конфіденційною інформацією, тому кількісна оцінка економічного ефекту в межах цієї статті не наводиться. Але, застосування запропонованого підходу дозволить підприємствам підгалузі більш обґрунтовано приймати рішення щодо застосування описаного способу утилізації фусів кам'яновугільних та обсягу такої утилізації.

В цілому отримані результати, на нашу думку, є практичною реалізацією сформульованих нами раніше основних принципів використання відходів за виробництва коксу [1]. Аналогічним чином може використовуватись в шихтах і низка інших смоло-оливних відходів, зокрема, смоли та оливи, що виділяються зі стічних вод коксохімічного виробництва за їх відстоювання, суміші кам'яновугільної смоли із шихтою, утворювані внаслідок ліквідації розливів у хімічних цехах, відходи від пропарювання газопроводів, шлам і нафталін від зачищення цистерн та хімічної апаратури.

Висновки

1. На підставі сформульованих раніше основних принципів використання вторинних сировинних ресурсів за виробництва коксу здійснені дослідження з утилізації у складі вугільних шихт найбільш великотонажного супутнього продукту виробництва коксу – фусів кам'яновугільних.

2. Лабораторними проробками встановлено, що додавання фусів до складу вугільних шихт дозволяє дещо підвищити спіклівість шихти, збільшити величину щільності насипної маси шихти в камері коксування і поліпшити якість коксу. Тобто, фуси є ефективною органічною добавкою у виробництві коксу.

3. Обґрунтована раціональна кількість фусів, доданих до шихти – 1 % від маси шихти (понад 100 %). Це дозволяє повністю утилізувати всю кількість утворюваних фусів.

4. Дослідно-промисловими роботами встановлено, що додавання фусів кам'яновугільних до виробничої шихти коксохімічного підприємства в зазначеній кількості практично не змінює властивості отриманого коксу.

5. Додавання до шихти фусів кам'яновугільних є не лише екологічним, але й економічно доцільним заходом. Запропонований методичний підхід до оцінки економічної ефективності такого заходу.

6. Аналогічним чином можуть утилізуватись й інші смоло-оливні супутні продукти, отримувані за виробництва коксу.

Бібліографічний список

1. **Борисенко О.Л.** Охорона довкілля та принципи використання відходів при виробництві коксу / **О.Л. Борисенко, І.В. Шульга, Ю.В. Телешев, Є.І. Котлярів**

// Вуглехімічний журнал. – 2025. – № 1. – С. 16-26.
<https://doi.org/10.31081/1981-309X-2025-0-1-16-26>.

2. **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.

3. **Філатов Ю.В.** Теорія та практика виробництва та застосування доменного коксу покращеної якості / **Ю.В. Філатов, Є.Т. Ковальов, І.В. Шульга [та ін.]**. – Київ: Наукова думка, 2011. – 128 с.

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

5. **Скляр М.Г.** Хімія твердих горючих копалин. Лабораторний практикум / **М.Г. Скляр, Ю.Б. Тютюнников**. – Київ: Вища школа, 1985. – 247 с.

6. **Мірошніченко Д.В.** Лабораторні методи визначення виходу та якості основних хімічних продуктів коксування / **Д.В. Мірошніченко** / Довідник коксохіміка. 3-тє вид. Т.1. Вугілля для коксування. Збагачення вугілля. Підготовка вугілля до коксування. – Харків: ВД ІНЖЕК, 2010. – С. 79-88.

7. **Нестеренко Л.Л.** Основи хімії та фізики горючих копалин / **Л.Л. Нестеренко, Ю.В. Бірюков, В.І. Лебедєв**. – Київ: Вища школа, 1987. – 359 с.

8. ПТЕ-2017. Правила технічної експлуатації коксохімічних підприємств. – Харків: ДП ГИПРОКОКС, 2018. – 274 с.

Рукопис надійшов до редакції 27.06.2025

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-3-3-12

Specialty 161. U.D.C. 662.74

USE OF RELATED RESIN-OIL PRODUCTS IN COAL MIXTURES FOR COKING

© **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

Scientific Research Centre for Industrial Problems of Development of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ia 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 Yuriy Volodymyrovych Teleshev, Ph.D. in Technical Sciences, e-mail: 196112juv@gmail.com

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

In accordance with the previously formulated basic principles for the use of secondary raw materials in coke production, work has been carried out on the experimental and industrial coking of coal charges with the addition of tar-oil by-products. In coke chemical production, the most voluminous products are a mixture of tar and coal fines (MTCF, or so-called "fuses"), which are formed during the loading of the charge into the coking chambers and are subsequently separated in mechanized clarifiers in the gas cooling and tar condensation sections of the coke chemical product recovery workshops. It has been established that when 1 to 10 % of MTCF is added to the charge, the grindability of laboratory coke improves by 0.3–4.6 %, and its abrasion resistance by 0.2–1.3 %. However, the coke yield from the charge decreases by 0.9–3.3 %. The addition of MTCF allows the bulk density of the charge to be increased, so that with a small amount of MTCF added (1 %), the single load and coke yield from one chamber increase. However, in the future, the bulk density of the charge increases more slowly than the coke yield from the charge decreases, and the increase in bulk density does not compensate for the decrease in coke yield from the chamber – the latter value begins to decrease. Based on this, the dose of MTCF added to the charge was determined to be 1 % – at the maximum coke yield from one chamber. This allows for the complete utilisation of MTCF, which are formed in significantly smaller quantities – 0.04–0.06 % of the charge mass. The results obtained in the laboratory were confirmed during experimental industrial coking: when 1 % of MTCF was added to the charge, the strength of the coke improved: by 0.2 % according to the M25 indicator and by 0.1 % according

to the M10 indicator. A number of other tar-oil by-products can be used in batches in a similar way, in particular resins and oils extracted from wastewater from coke production, mixtures of coal tar with coke oven waste formed as a result of spill clean-up in chemical workshops, waste from gas pipeline steaming, sludge and naphthalene from cleaning tanks and chemical equipment.

Keywords: environmental protection, coke production, coking, secondary raw materials, by-products, coal tar, a mixture of tar and coal fines, charging into the coal blend.

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

Manuscript received 2025/06/27

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-3-12-20

Спеціальність 161. УДК 661.183:504.53

СОРБЕНТИ НА ОСНОВІ БУРОГО ВУГІЛЛЯ ТА ПРОДУКТІВ ЙОГО ПЕРЕРОБКИ: ОГЛЯД

© С.В. Пиш'єв¹, Ю.В. Липко², М.Є. Швед³, М.В. Нявкевич⁴

Національний університет «Львівська політехніка», 79013, вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна

¹ Пиш'єв Сергій Вікторович, докт. техн. наук, проф., проф. кафедри хімічної технології переробки нафти та газу (ХТНГ), e-mail: serhii.v.pyshiev@lpnu.ua

² Липко Юрій Васильович, Ph.D., мол. наук. співр. кафедри ХТНГ, e-mail: KhTNH.dept@lpnu.ua

³ Швед Марія Євгенівна, канд. техн. наук, старший викладач кафедри захисту інформації, e-mail: zi.dept@lpnu.ua

⁴ Нявкевич Максим Валентинович, студент кафедри ХТНГ, e-mail: KhTNH.dept@lpnu.ua

У статті наведено комплексний аналітичний огляд сучасних наукових підходів до використання бурого вугілля (лігніту) та продуктів його переробки як ефективних сорбційних матеріалів для очищення забрудненого довкілля. Розкрито фізико-хімічні характеристики лігніту, що обумовлюють його високу сорбційну активність, зокрема пористу морфологію, наявність функціональних груп (карбоксильних, фенольних, гідроксильних), а також виражену здатність до іонного обміну. Узагальнено результати експериментальних досліджень, які підтверджують ефективність бурого вугілля щодо вилучення токсичних іонів важких металів (Cr(VI), Cd(II), Cu(II), Fe²⁺, Ni, Pb, Zn) із водних середовищ, а також його здатність до стабілізації забруднених ґрунтів.

Особливу увагу приділено гуміновим кислотам, як однієї з найперспективніших похідних бурого вугілля. Гумінові кислоти, виділені з лігніту, завдяки своїй високомолекулярній поліелектролітній природі, наявності численних функціональних груп (карбоксильних, фенольних, гідроксильних) та здатності до хелатоутворення з іонами металів, демонструють високу ефективність у вилученні важких металів із водного та ґрунтового середовищ. Проаналізовано механізми сорбції, зокрема іонний обмін, комплексоутворення, гідрофобну взаємодію та псевдоміцелярну організацію, які обумовлюють високу селективність і сорбційну ємність гуматів.

Також проаналізовано практичні аспекти впровадження лігнітних сорбентів у технологічні рішення з очищення природних та стічних вод, а також ґрунтів – як у вигляді окремих сорбційних агентів, так і в комбінації з іншими – природними матеріалами, зокрема модифікованими цеолітами. Підкреслено, що сорбенти на основі бурого вугілля характеризуються низькою собівартістю, високою доступністю, екологічною безпечністю та здатністю до регенерації, що визначає їх перспективність для використання у системах екологічної ремедіації та сталого управління техногенними відходами.

Ключові слова: буре вугілля, лігніт, гумінові кислоти, сорбенти, важкі метали, іони, ремедіація ґрунтів.

Автор для листування С.В. Пиш'єв, e-mail: serhii.v.pyshiev@lpnu.ua

1. Вступ

Буре вугілля (лігніт) належить до найпоширеніших типів викопного палива, що відіграє вагомую роль у формуванні енергетичного потенціалу багатьох країн, зокрема України. Висока доступність, значні поклади та порівняно низька собівартість зумовлюють широкі можливості його міжгалузевого використання, насамперед у теплоенергетиці та хімічній промисловості. За інформацією Міжнародного енергетичного агентства (IEA), станом на кінець 2024 року підтверджені запаси лігніту та суббітумінозного вугілля в Україні становлять близько 2,9 млрд т, що забезпечує їй 15-те місце у світовому рейтингу за цим показником [1]. З урахуванням поточних та історичних темпів видобутку, наявні запаси бурого вугілля можуть забезпечити стабільне функціонування галузі протягом щонайменше 75 років, що додатково підкреслює його стратегічне значення для національної енергетичної безпеки [2].

Разом з тим, сучасні глобальні виклики, передусім орієнтовані на зниження викидів парникових газів, впровадження кліматично нейтральних технологій та перехід до відновлюваних джерел енергії, актуалізують необхідність перегляду підходів до використання бурого вугілля. Визначальним зовнішньополітичним орієнтиром для України в цьому контексті є Європейський зелений курс, ухвалений Європейською Комісією у 2019 році, який передбачає досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року [3].

У межах міжнародних зобов'язань, прийнятих Україною відповідно до Паризької кліматичної угоди, держава послідовно інтегрує положення глобальної кліматичної політики у національні стратегічні документи [4, 5]. Так, у Енергетичній стратегії України на період до 2050 року закладено курс на поетапну трансформацію вугільної галузі, що передбачає зниження залежності від викопного палива [5]. Ключовим напрямом зазначеної трансформації виступає впровадження низьковуглецевих енергетичних технологій у поєднанні з активізацією розвитку відновлюваних джерел енергії, що повністю узгоджується з актуальними міжнародними екологічними стандартами та цілями сталого розвитку, визначеними ООН [6].

У контексті глобальних викликів, пов'язаних із необхідністю зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище, дослідження шляхів раціонального використання бурого вугілля набуває особливої актуальності як з наукової, так і з прикладної точки зору. Одним із перспективних напрямів є створення високо-ефективних сорбційних матеріалів на основі бурого вугілля та продуктів його термохімічної або фізико-хімічної модифікації. У даній статті представлено огляд сучасних методів одержання, модифікації та практичного застосування сорбентів, синтезованих на основі бурого вугілля та супутніх продуктів його переробки,

зокрема у контексті їх потенціалу щодо підвищення рівня екологічної безпеки. Як правило, такі дослідження спрямовані на сорбцію важких металів.

2. Екологічні ризики поширення важких металів

Викиди токсичних забруднювачів, зокрема сполук важких металів (ВМ), є характерним наслідком функціонування ряду галузей промисловості – гірничодобувної, металургійної, гальванічної, а також виробництва акумуляторів, барвників і шкіряної продукції. До категорії важких металів, які визначаються як елементи з густиною понад 4,5 г/см³, належать кадмій (Cd), ртуть (Hg), свинець (Pb), миш'як (As), хром (Cr), мідь (Cu), нікель (Ni), цинк (Zn), залізо (Fe) та інші елементи [7, 8]. Унаслідок виробничої діяльності ці метали можуть потрапляти у довкілля як у безпосередній, так і в опосередкований спосіб, зрештою акумулюючись у ґрунтах та водних екосистемах внаслідок включення у природні геохімічні цикли.

Наявність важких металів у водному середовищі становить суттєву екологічну та епідеміологічну загрозу через їх стійкість до біодеградації та здатність до біоаккумуляції в трофічних ланцюгах. Навіть слідові концентрації (понад 10 мкг/л) таких елементів, як Cd, Hg, Pb і As, можуть спричинити гострі та хронічні форми інтоксикації, зокрема нефротоксичність, остеотоксичні ураження, гематологічні порушення, нейротоксичність та канцерогенез [7]. Особливо небезпечним є шестивалентний хром (Cr(VI)), який визнаний високотоксичним канцерогеном із переважним впливом на дихальні шляхи. Надмірне надходження Cr(III), Cu, Ni та Zn також асоціюється з токсичними ефектами, що вражають печінку, нирки та органи шлунково-кишкового тракту [7, 8].

Окрему увагу у дослідженнях якості водних ресурсів слід приділяти залізу – одному з найпоширеніших хімічних елементів земної кори, який широко представлений у природних водах, зокрема у поверхневих і підземних водоносних горизонтах, переважно у формі розчинених іонів Fe²⁺ та Fe³⁺ [9, 10]. Джерела надходження заліза у водне середовище здебільшого пов'язані з корозійними процесами у металевих трубопроводах, вилуговуванням мінералів, багатих на залізо, а також з антропогенними впливами, зокрема сільськогосподарською діяльністю, гірничодобувною та металургійною промисловістю [11].

Попри важливу біологічну функцію заліза як незамінного мікроелемента, що бере участь у таких життєво необхідних процесах, як еритропоез, клітинне дихання та енергетичний метаболізм, перевищення його концентрації у питній воді понад гранично допустимий рівень 0,3 мг/л, встановлений Всесвітньою організацією охорони здоров'я, становить суттєву загрозу для здоров'я населення [12]. З гігієнічної та експлуатаційної

точки зору, надлишок розчиненого заліза також значно погіршує органолептичні властивості води – надає їй характерного металевого присмаку, спричиняє зміну кольору на жовто-бурий та утворення осаду на сантехнічних поверхнях. Крім того, присутність заліза у водопровідних системах сприяє росту залізоокислювальних бактерій, що може призводити до біоплівкоутворення, зниження пропускну здатності труб і збільшення витрат на обслуговування інфраструктури [10].

В Україні проблема накопичення важких металів у водному середовищі набула особливої гостроти, в т.ч. як наслідки агресії країни-терориста (росії). Переважна більшість поверхневих водних об'єктів країни досягає критичного рівня забруднення, що зумовлено, зокрема, незадовільною якістю очищених стічних вод. Основним джерелом надходження токсичних металів до водного середовища є недостатньо очищені промислові стоки, які надходять у річки й водойми без достатньої попередньої обробки. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, понад 30% очищених стоків не відповідають чинним нормативам, зокрема за показниками вмісту важких металів [13].

Поряд із деградацією водних екосистем фіксується інтенсивне забруднення верхніх горизонтів ґрунтового покриву, особливо в зонах, прилеглих до транспортної інфраструктури, промислових підприємств і кар'єрів. Для таких територій характерним є значне перевищення гранично допустимих концентрацій важких металів, зокрема свинцю (Pb), кадмію (Cd), міді (Cu), цинку (Zn) та нікелю (Ni), що у ряді випадків перевищують нормативи у десятки разів [14–16]. Подібна екологічна ситуація спричиняє деградацію ґрунтової родючості, зниження продуктивності сільськогосподарських культур і зростання ризиків екотоксикологічного характеру внаслідок перенесення токсичних елементів у трофічні ланцюги [17, 18].

У зв'язку з цим проблема ремедіації водного середовища й ґрунтів від ВМ набула пріоритетного значення для науки і практики. У світовій науковій спільноті інтенсивно розробляються інноваційні підходи до глибокого очищення забруднених середовищ, зокрема із застосуванням природних, модифікованих, біо- та наноструктурованих сорбентів [19]. Особливе місце у цьому напрямі посідають сорбенти на основі бурого вугілля (лігніту) та продуктів його хімічної модифікації, що поєднують високу ефективність вилучення іонів ВМ, доступність, низьку вартість і можливість регенерації [20].

У наступному розділах представлено огляд сучасних технологічних рішень із застосуванням сорбентів на основі бурого вугілля, які розглядаються як одні з найперспективніших засобів для ефективної детоксикації водних і ґрунтових середовищ.

3. Очищення водних середовищ

3.1 Адсорбційне очищення з використанням бурого вугілля

У класифікації вичопного палива буре вугілля розглядається як наймолодший тип вугілля, що морфологічно та за ступенем вуглефікації займає проміжне положення між торфом і кам'яним вугіллям. Характеризується коричнево-чорним кольором, пористою структурою та підвищеною хімічною реакційною здатністю [21]. Особливістю лігніту є високий вміст киснево-функціональних груп, таких як карбоксильні ($-\text{COOH}$), гідроксильні ($-\text{OH}$), фенольні ($\text{Ar}-\text{OH}$), альдегідні ($-\text{CHO}$) та карбонільні ($-\text{C}=\text{O}$), які беруть участь у хемосорбції катіонів металів [22, 23]. Серед них карбоксильні групи вважаються ключовими активними центрами, що відіграють провідну роль у процесах катіонного обміну. Завдяки цьому лігніт демонструє високу ефективність у сорбції іонів важких металів із водного та ґрунтового середовищ. Крім того, лігніт має значну питому поверхню, високу катіонообмінну ємність та добру хімічну і біологічну стабільність, що сприяє його тривалому використанню в складних техногенних умовах. З огляду на ці характеристики, лігніт вважається перспективним і селективним адсорбційним агентом для вилучення важких металів з промислових стічних вод і радіоактивних відходів. Його низька вартість, а також відносна легкість у поводженні після адсорбції, додатково підсилюють доцільність застосування цього матеріалу у технологіях очищення [20].

У межах роботи [20] здійснено комплексне дослідження адсорбційних властивостей природного бурого вугілля щодо вилучення іонів двовалентного заліза (Fe^{2+}) з підземних вод. Особливу увагу приділено аналізу впливу ключових експлуатаційних чинників, таких як рН середовища, температури, початкова концентрація іонів металу, на ефективність процесу сорбції. Окрім того, досліджено регенераційний потенціал сорбенту та його ефективність при повторному використанні. Результати рівноважного аналізу показали, що модель Ленгмюра найточніше апроксимує експериментальні дані, про що свідчить високий коефіцієнт детермінації ($R^2 = 0,983$). На основі цієї моделі було розраховано максимальну адсорбційну ємність бурого вугілля, яка склала 1,41 мг/г. Кінетичні дослідження підтвердили відповідність процесу моделі псевдодругого порядку, що свідчить про переважання хемосорбційного механізму взаємодії між сорбентом і йонами заліза.

Подальший аналіз впливу фізико-хімічних параметрів виявив, що збільшення температури, рівня рН та початкової концентрації Fe^{2+} призводить до зростання ефективності вилучення заліза, що дозволяє класифікувати процес як ендотермічний. При цьому фіксується зростання ентропії на межі поділу фаз, що інтерпретується як зростання ступеня хаотичності системи внаслідок адсорбції.

Експериментальні дані також засвідчили високу стабільність сорбційної активності бурого вугілля при циклічному використанні. Після чотирьох послідовних циклів адсорбції-регенерації матеріал зберіг значну частину своєї сорбційної здатності, що підтверджує його придатність для багаторазового застосування у системах водоочищення. Водночас було виявлено, що наявність у водному розчині багатозарядних катіонів негативно впливає на ефективність вилучення Fe^{2+} через прояви конкурентного впливу.

Загалом результати дослідження свідчать про перспективність використання бурого вугілля як недорогого, доступного та екологічно безпечного сорбенту для ефективного видалення заліза з підземних вод природного походження.

Серед сучасних підходів до видалення шестивалентного хрому (Cr(VI)) зі стічних вод особливу увагу привертає використання природних сорбентів, зокрема бурого вугілля [17, 18]. Механізм зв'язування Cr(VI) з поверхнею сорбенту включає комплекс хімічних і фізико-хімічних процесів: іонний обмін, поверхневу та хемосорбцію, утворення координаційних комплексів і механізмів адсорбційно-комплексотворення.

У роботі [24] досліджено ефективність вилучення Cr(VI) із модельних водних розчинів за допомогою бурого вугілля та модифікованого цеоліту. Адсорбційні процеси вивчалися у періодичному (batch) режимі, з урахуванням впливу таких експлуатаційних параметрів, як рН середовища, доза сорбенту та їх масове співвідношення. Встановлено, що максимальне видалення Cr(VI) бурим вугіллям досягається за рН = 4 та концентрації сорбенту 60 г/л. Натомість для цеоліту необхідна попередня модифікація, яка забезпечує стабільно високу ефективність вилучення хрому у широкому діапазоні рН (2–8) за дози 10 г/л.

Комбіноване застосування бурого вугілля і модифікованого цеоліту у масовому співвідношенні 3:1 забезпечує ефективність очищення понад 99%, навіть без необхідності попереднього коригування рН. Ізотерми адсорбції для бурого вугілля найбільш точно описуються моделлю Ленгмюра, тоді як для модифікованого цеоліту адекватнішою виявилась модель Фрейндліха. Кінетика процесу відповідала моделі псевдодругого порядку, що свідчить про хімічну природу взаємодії між сорбентом і іонами Cr(VI) .

У дослідженні [25] було розглянуто сорбційні властивості бурого вугілля з родовищ Конья (Туреччина). Адсорбційна здатність сорбентів оцінювалася в межах визначених параметрів: часу контакту, початкового рН, концентрації Cr(VI) , температури та маси сорбенту. Найвищу ефективність вилучення Cr(VI) було зафіксовано у вузькому діапазоні рН 2,0–3,2. Значення рН, за якого досягалася рівновага, залежало від конкретного зразка і становило 2,3–3,2.

Ізотермічний аналіз підтвердив придатність моделі Фрейндліха для опису процесу адсорбції, а рівноважний стан у динамічних випробуваннях досягався протягом 80 хвилин. Максимальна сорбційна ємність варіювалася від 6,8 до 12,4 мМ/г залежно від характеристик конкретного зразка. Невелике зниження константи рівноваги при підвищенні температури свідчить про екзотермічний характер процесу. За ефективністю вилучення Cr(VI) деякі зразки бурого вугілля демонстрували адсорбційні характеристики, порівнянні з комерційними активованими сорбентами, що підтверджує їхній високий потенціал для практичного застосування у технологіях очищення стічних вод.

Також заслуговує на увагу процес сорбції із застосуванням модифікованого лігніту [26–29], зважаючи на його потенціал як ефективного та економічно доцільного адсорбента для вилучення іонів важких металів із водного середовища. Необроблений лігніт характеризується порівняно низькою адсорбційною здатністю щодо іонів важких металів, що поступається ефективності синтетичних іонообмінних матеріалів, що, у свою чергу, значно обмежує можливості його практичного застосування в технологіях очищення води та рекультивції забруднених ґрунтів [29]. У зв'язку з цим останніми роками активно впроваджуються різні підходи до модифікації лігніту, спрямовані на підвищення його пористості, вмісту активних функціональних груп та хімічної стабільності. Застосування таких технологій дозволяє суттєво розширити адсорбційний потенціал лігніту й адаптувати його властивості до сучасних вимог систем екологічної ремедіації.

У дослідженнях, описаних у роботі [29] розглянуто можливість використання модифікованого бурого вугілля як недорогого та ефективного адсорбенту для вилучення іонів важких металів із водних розчинів. Як сировину було використано лігніт Пінчжуан, який піддавався біотрансформації за допомогою штаму *Fusarium lignite* В3 з метою отримання біомодифікованого лігнітного адсорбенту (БЛА). Внаслідок мікробної обробки спостерігалось істотне підвищення вмісту кисню, водню та азоту у структурі БЛА, а також збільшення питомої площі поверхні з 1,81 до 5,66 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. Це свідчить про покращення морфологічних та хімічних характеристик адсорбенту, що, своєю чергою, сприяє ефективнішій взаємодії з іонами металів.

З метою вивчення ефективності вилучення іонів важких металів із водного розчину як модельний компонент було використано Cu(II) . Результати кінетичних досліджень показали, що динаміка адсорбції добре описується моделлю псевдодругого порядку, а ізотермічні дані узгоджуються як із моделлю Ленгмюра, так і з моделлю Фрейндліха, причому остання продемонструвала кращу відповідність експериментальним даним, що свідчить про наявність гетерогенної поверхні та потенціал для багатозарядної адсорбції.

Максимальна теоретична адсорбційна здатність для Cu(II) за моделлю Ленгмюра становила $71,47 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$, а фактично досягнута у динамічному режимі – $65 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ при рівноважному часі 120 хв. Встановлено, що нейтральне значення рН та більший розмір частинок сорбенту є сприятливими факторами для адсорбції іонів важких металів. Порівняльний аналіз необробленого лігніту та ВЛА засвідчив значне покращення сорбційних властивостей останнього щодо Cu(II), Hg(II), Mn(II) та Cd(II), із такою послідовністю ефективності: Cu(II) > Hg(II) > Mn(II) > Cd(II).

Структурно-морфологічні зміни після мікробної обробки були підтверджені за допомогою SEM-EDS та FTIR-аналізу. Виявлено збільшення питомої площі поверхні (з 1,81 до $5,66 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$), пористості, а також зростання вмісту активних функціональних груп – карбоксильних (–COOH), фенольних (Ar–OH) та гідроксильних (R–OH), які беруть участь у механізмах хемосорбції.

Таким чином, результати дослідження свідчать про те, що біотрансформоване буре вугілля може розглядатися як перспективний низьковартісний і екологічно безпечний адсорбент для очищення водного середовища від іонів токсичних металів. Запропонована методика біологічної модифікації лігніту є енергоощадною, не потребує агресивних реагентів та здатна забезпечити високу ефективність процесів сорбції і пасивації.

3.2 Адсорбційне очищення з використанням гумінових кислот, отриманих з бурого вугілля

На основі сучасних літературних джерел [3, 30-33] встановлено, що одним із найбільш перспективних напрямів очищення водного середовища від іонів важких металів є використання сорбційних матеріалів на основі гумінових кислот, в т.ч. солей лужних металів – гуматів, отриманих із бурого вугілля. Висока ефективність таких сорбентів зумовлена унікальними фізико-хімічними властивостями гумінових кислот, які є природними високомолекулярними поліелектролітами з вираженою гетерогенною структурою.

Молекулярна маса гумінових кислот, згідно з даними [34], варіює в широкому діапазоні – від 1500 до 50000 умовних одиниць, що зумовлено як геологічним походженням сировини, так і специфікою методу виділення. Така варіативність дозволяє адаптувати властивості гуматів під конкретні технологічні задачі. Висока молекулярна маса в поєднанні з наявністю значної кількості функціональних кисневмісних груп – карбоксильних, гідроксильних, фенольних, спиртових – формує активні центри сорбції, які відповідають за іоннообмінні та хелатуючі властивості матеріалу.

Особливо важливу роль у процесах вилучення іонів металів відіграють фенольні та карбоксильні групи, інтегровані в ароматичні ядра полімерної матриці гумінових кислот. Ці групи здатні формувати стабільні

комплекси з катіонами важких металів, що забезпечує високу селективність і ефективність сорбції навіть при наявності конкурентних іонів у водному середовищі [30-33]. Такий хімічний склад і структура гумінових кислот визначають їх як високоефективні природні сорбенти для очищення вод від токсичних металів. Технологія отримання гуматів передбачає лужну екстракцію гумінових кислот з бурого вугілля, внаслідок якої утворюються водорозчинні солі лужних металів [31, 32]. Ці сполуки проявляють підвищену сорбційну активність щодо іонів важких металів, зокрема таких токсичних елементів, як ртуть (Hg), свинець (Pb), кадмій (Cd), а також метали, що часто зустрічаються у промислових стоках – мідь (Cu^{2+}), цинк (Zn^{2+}), нікель (Ni^{2+}), хром ($\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{6+}$) тощо. Висока спорідненість функціональних груп гуматів до зазначених йонів зумовлює ефективне їх вилучення навіть за умов низьких концентрацій у водному середовищі.

Іоннообмінні та хелатоутворюючі властивості гуматів забезпечують селективну сорбцію залежно від значення рН, температури, іонної сили та наявності конкурентних йонів, що дозволяє адаптувати процес під конкретні умови очищення. Утворені комплекси можуть бути ефективно вилучені з водного розчину за допомогою методів ультрафільтрації, мембранної сепарації або електрохімічної десорбції, що забезпечує не лише очищення води, а й концентрування забруднювачів до рівнів, придатних для їх подальшої утилізації чи відновлення [30, 32].

Додатковою перевагою гумінових сорбентів є можливість їх багаторазового використання після регенерації, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню загальної ефективності технологічного процесу. У контексті сучасних вимог до екологічної безпеки та сталого розвитку такі сорбенти розглядаються як ефективна та доступна альтернатива традиційним методам очищення промислових і комунальних стоків від токсичних металів.

4. Застосування лігніту при очищенні ґрунтів від важких металів

Одним із перспективних підходів до детоксикації таких ґрунтів є використання природних сорбентів, зокрема бурого вугілля (лігніту). Застосування сорбентів на основі бурого вугілля сприяє зниженню біодоступності токсичних елементів та зменшенню їхньої мобільності в ґрунтовому середовищі [35]. Крім того, лігніт чинить стабілізуючу дію на агрофізичні властивості ґрунту, зокрема буферну ємність, структуру та вміст гумусу, що опосередковано підвищує його родючість [36].

У дослідженні [37] розглянуто можливість використання лігніту як адсорбенту для очищення ґрунтів від іонів кадмію, зокрема шляхом застосування гумінових речовин, отриманих із бурого вугілля. Було оцінено

їхню ефективність у зменшенні фітотоксичної дії кадмію на ячмінь (*Hordeum vulgare* L.) у різних ґрунтових умовах – суглинно-піщаному та мулистому (силуватору) ґрунтах.

У варіантах із внесенням кадмію встановлено суттєве пригнічення росту надземної маси ячменю: біомаса пагонів знизилася на 28% у мулистому ґрунті та на 37% у суглинно-піщаному порівняно з контролем, що свідчить про виражену токсичність іонів Cd. Водночас застосування гумінових речовин сприяло істотному покращенню ростових показників кореневої системи в умовах забруднення: приріст біомаси коренів становив 186% у мулистому та 55% у суглинно-піщаному ґрунті відносно контрольних варіантів без гумінових добавок.

Отримані результати підтверджують ефективність гумінових речовин як засобів біоактивації, здатних частково нейтралізувати токсичний вплив кадмію. Це обґрунтовує доцільність їхнього застосування як функціональних компонентів у системах фіторе mediaції кадмій-забруднених ґрунтів.

У дослідженні [38] було оцінено ефективність природних органічних поверхнево-активних речовин, зокрема гумінових кислот (ГК), отриманих із бурого вугілля, для одночасного вилучення важких металів (ВМ) і поліхлоробіфенілів (ПХБ) із сильно забрудненого промислового ґрунту північної Італії. Внаслідок формування надмолекулярної організації ГК у водному розчині утворюються псевдоміцелярні домени, що сприяють десорбції гідрофобних органічних забруднювачів з поверхні ґрунтових частинок. Одночасно кислотні функціональні групи ГК беруть участь у хелатоутворенні з катіонами важких металів, підвищуючи їх мобільність і подальше видалення. Результати експериментів засвідчили, що одноразове промивання ґрунту розчином ГК забезпечує ефективне вилучення як органічних, так і неорганічних забруднювачів. Зокрема, при співвідношенні розчин/ґрунт 1:1 і 10:1 було видалено 68% та 75% конгенерів ПХБ відповідно. Середній рівень вилучення ВМ становив 47%, із максимальними значеннями 57% для ртуті (Hg) та 67% для міді (Cu). Порівняно з водою, розчини ГК виявилися значно ефективнішими завдяки наявності гетерогенних функціональних груп, здатних до комплексоутворення, а також здатності до створення гідрофобних ніш, що утримують органічні ксенобіотики.

Промивання ґрунтів гуміновими речовинами є не лише високоефективним, але й екологічно доцільним методом, який не потребує використання агресивних синтетичних реагентів або органічних розчинників. Такий підхід зберігає біорізноманіття ґрунтової екосистеми, сприяє природному розкладанню залишкових забруднювачів і підвищує ефективність подальших технологій рекультивації, зокрема біо- та фіторе mediaції.

Крім того, застосування ГК дозволяє не лише зменшити навантаження на навколишнє середовище, а й спростити утилізацію вилучених забруднювачів, оскільки насичені ГК розчини можуть бути знешкоджені шляхом спалювання поза межами ділянки (*ex situ*). Додатковою перевагою є збереження у ґрунті метаболічно активного вуглецю, що стимулює подальше мінералізування залишкових органічних речовин.

Таким чином, гумінові поверхнево-активні речовини на основі ГК становлять перспективну, екологічно чисту та економічно обґрунтовану альтернативу синтетичним агентам у технологіях очищення ґрунтів, забруднених важкими металами та стійкими органічними забруднювачами.

У дослідженні [39] розглянуто потенціал модифікованого бурого вугілля для вилучення іонів кадмію не лише з ґрунтових, а й із водних середовищ. У рамках роботи було синтезовано два типи функціоналізованих матеріалів – Mg-LM та P-LM – шляхом хімічної імпрегнації бурого вугілля іонами магнію та фосфату відповідно. Основною метою дослідження було підвищення ефективності адсорбції та іммобілізації Cd(II) у забруднених водних і ґрунтових системах.

Результати фізико-хімічної характеристики продемонстрували успішне введення обмінних іонів магнію до структури Mg-LM, що супроводжувалося покращенням порової морфології матеріалу. У випадку P-LM було зафіксовано зростання концентрації кисневмісних функціональних груп, а також підвищення вмісту обмінного кальцію та фосфору, що позитивно впливало на хімічну взаємодію з кадмієм. Адсорбційні процеси на обох матеріалах описувалися кінетичною моделлю псевдодругого порядку та ізотермою Ленгмюра. Максимальна адсорбційна здатність Cd(II) становила 1033 мг/г для Mg-LM та 55 мг/г для P-LM.

У ґрунтових тестах найефективніше зниження вмісту ДТРА-екстрагованого кадмію було досягнуто при застосуванні P-LM (32,9%), тоді як для Mg-LM цей показник становив 20,2%, а для немодифікованого бурого вугілля – 11,1%. Дані, отримані методом послідовної екстракції за схемою BCR, вказують на здатність обох модифікованих матеріалів переводити кадмій із рухомих (кислоторозчинних та відновлювальних) форм у стабільні фракції з низькою біодоступністю.

Спектроскопічний аналіз за методиками XRD, FTIR та XPS дозволив ідентифікувати основні механізми адсорбції та іммобілізації Cd(II), серед яких ключову роль відіграють електростатичні взаємодії, іонний обмін, утворення поверхневих комплексів та процеси осадження.

Отже, Mg-LM доцільно застосовувати для очищення водних середовищ, тоді як P-LM виявився більш ефективним для фіксації кадмію у забруднених ґрунтах, що підтверджує їхню перспективність у технологіях екологічної ре mediaції.

5. Висновки

У результаті проведеного оглядового аналізу встановлено, що буре вугілля та продукти його переробки є ефективною основою для створення сорбентів, здатних до вилучення іонів важких металів та стійких органічних забруднювачів із водного та ґрунтового середовищ. Високий вміст киснево-функціональних груп, значна питома поверхня, катіонообмінна здатність і можливість модифікації визначають сорбційну активність лігніту та продуктів його переробки. Результати численних досліджень засвідчують ефективність як природного, так і модифікованого бурого вугілля (біотрансформованого, хімічно активованого, імпрегнованого тощо) у процесах очищення.

Особливу увагу заслуговують гумінові кислоти, отримані з бурого вугілля, що демонструють високу селективність до іонів металів завдяки наявності хелатуючих функціональних груп. Експериментальні дані підтверджують здатність таких сорбентів до багаторазового використання без істотної втрати ефективності, що дозволяє розглядати їх як екологічно безпечну та економічно доцільну альтернативу традиційним адсорбентам.

Отримані результати свідчать про високий потенціал буровугільних сорбентів у технологіях водоочищення, рекультивативі забруднених ґрунтів та екологічної ремедіації, що обґрунтовує доцільність подальших досліджень у напрямі оптимізації їхнього складу та умов застосування.

Бібліографічний список

1. International Energy Agency. *Coal Information: Overview – 2024 Edition* / [Електронний ресурс]. Paris: IEA, 2024. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/coal-information-overview>, вільний. – Дата звернення: 20.05.2025.

2. Пиш'єв С.В., Мірошніченко Д.В., Швед М.Є., Корчак Б.О., Лебедєв В.В. Реєстр родовищ бурого вугілля України, які рекомендовано використовувати в «зелених» технологіях: довідник. Львів: Сполом, 2024. 148 с.

3. European Council, Council of the European Union. *European Green Deal* / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, вільний. – Дата звернення: 20.05.2025.

4. Кабінет Міністрів України. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року: розпорядження від 21 квіт. 2023 р. № 373-р / [Електронний ресурс]. Київ, 2023. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text>, вільний. – Дата звернення: 20.05.2025.

5. Аналітичний огляд оновленого національно визначеного внеску України до Паризької угоди / [Електрон-

ний ресурс]. – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/Analitychnyj-oglyad-NVV-lypen-2021.pdf>, вільний. – Дата звернення: 20.05.2025.

6. United Nations. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. A/RES/70/1* / [Електронний ресурс]. New York: United Nations, 2015. – Режим доступу: <https://docs.un.org/en/A/RES/70/1>, вільний. – Дата звернення: 20.05.2025.

7. Mei Y., Zhuang S., Wang J. Adsorption of heavy metals by biochar in aqueous solution: A review // *Science of The Total Environment*. 2025. Vol. 968. Article 178898. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178898>.

8. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans // *Heliyon*. 2020. Vol. 6, No. 9. e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>.

9. Bin Jusoh A., Cheng W.H., Low W.M., Nora'aini A., Noor M.M.M. Study on the removal of iron and manganese in groundwater by granular activated carbon // *Desalination*. 2005. Vol. 182, No. 1–3. P. 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.022>.

10. Chaturvedi S., Dave P.N. Removal of iron for safe drinking water // *Desalination*. 2012. Vol. 303. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.003>.

11. Tekerlekopoulou A.G., Pavlou S., Vayenas D.V. Removal of ammonium, iron and manganese from potable water in biofiltration units: a review // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2013. Vol. 88. P. 751–773. <https://doi.org/10.1002/jctb.4031>.

12. Khatir N., Tyagi S., Rawtani D. Recent strategies for the removal of iron from water: A review // *Journal of Water Process Engineering*. 2017. Vol. 19. P. 291–304. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.08.015>.

13. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні за 2022 рік / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua>, вільний. – Дата звернення: 23.05.2025.

14. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4th ed. Boca Raton–London–New York: CRC Press, 2011. 520 p.

15. Alloway B.J. *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>.

16. Tóth G., Hermann T., Da Silva M.R., Montanarella L. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety // *Environment International*. 2016. Vol. 88. P. 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>.

17. Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks

and best available strategies for remediation // *ISRN Ecology*. 2011. Article ID 402647. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>.

18. **Sharma B., Dangi A.K., Shukla P.** Contemporary enzyme based technologies for bioremediation: A review // *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 210. P. 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.075>.

19. **Shrestha B., Kour J., Ghimire K.N.** Adsorptive removal of heavy metals from aqueous solution with environmental friendly material—exhausted tea leaves // *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2016. Vol. 6, No. 4. P. 525–540. <https://doi.org/10.4236/aces.2016.64046>.

20. **Quansah J.O., Obiri-Nyarko F., Karikari A.Y.** Adsorptive removal of dissolved iron from groundwater by brown coal – a low-cost adsorbent // *Journal of Contaminant Hydrology*. 2024. Vol. 260. Article 104283. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104283>.

21. **Pehlivan E., Arslan G.** Comparison of adsorption capacity of young brown coals and humic acids prepared from different coal mines in Anatolia // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 138. P. 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.063>.

22. **Jochova M., Punocha M., Horacek J., Stamberg K., Vopalka D.** Removal of heavy metals from water by lignite-based sorbents // *Fuel*. 2004. Vol. 83. P. 1197–1203. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2003.11.014>.

23. **Murakami K., Yamada T., Fuda K.** Selectivity in cation exchange property of heat-treated brown coals // *Fuel*. 2001. Vol. 80. P. 599–605. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00124-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00124-1).

24. **Binabaj M.A., Nowee S.M., Ramezani N.** Comparative study on adsorption of chromium(VI) from industrial wastewater onto nature-derived adsorbents (brown coal and zeolite) // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2018. Vol. 15, No. 7. P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1476-y>.

25. **Arslan G., Pehlivan E.** Batch removal of chromium(VI) from aqueous solution by Turkish brown coals // *Bioresource Technology*. 2007. Vol. 98, No. 15. P. 2836–2845. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.041>.

26. **Miao Z., Pei Z., Gao M., Wan K., He Q.** Exploring a new way to generate mesopores in lignite by employing steam explosion // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2021. Vol. 44. P. 600–610. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1630036>.

27. **Sakthivel A., Thangagiri B., Jeyasubramanian K., Raja J.D., Prabhakar R.S.S., Nayagi S.P.B., Krishnamurthy N.** Switching the hydrophobic Neyveli lignite into hydrophilic type by surface modification and its subsequent use for removing Cr(VI)/F from artificial pollutant // *Fuel*. 2021. Vol. 298. Article 120787. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120787>.

28. **Jin Y., Liu Z., Han L., Zhang Y., Li L., Zhu S., Peng Z., Li J., Wang D.** Synthesis of coal-analcime

composite from coal gangue and its adsorption performance on heavy metal ions // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 423. Article 127027. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127027>.

29. **Cheng J., Zhang S., Fang C., Ma L., Duan J., Fang X., Li R.** Removal of heavy metal ions from aqueous solution using biotransformed lignite // *Molecules*. 2023. Vol. 28, No. 13. Article No. 5031. <https://doi.org/10.3390/molecules28135031>.

30. **Melnykov A., Miroschnichenko D., Karnozhyskyi P.P., Karnozhyskyi P.V.** Sorption properties of brown coal processing products // *Chemistry & Chemical Technology*. 2024. Vol. 18, No. 4. P. 493–501. <https://doi.org/10.23939/chcht18.04.493>.

31. **Сініціна А.О., Карноژیцький П.П.** Буре вугілля – сировина для отримання водорозчинних сорбентів // *Системи управління та обробки інформації*. 2023. № 3. С. 67–72. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.3.06>.

32. **Miroschnichenko D., Lebedev V., Shved M., Fedevych O., Pyshevyev S.** Valorization of lignite use in “green” technologies: a review // *Chemistry & Chemical Technology*. 2025. Vol. 19, No. 1. P. 157–173. <https://doi.org/10.23939/chcht19.01.157>.

33. **Карножицький П.П., Мірошниченко Д.В., Карножицький П.В., Руднева К.Є.** Розробка пілотної установки для отримання розчину гуматів з бурого вугілля // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. 2025. № 1. С. 38–42. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2025.01.06>.

34. **Schnitzer M., Khan S.U.** Humus Substances: Chemistry and Reactions // *Soil Organic Matter. Development of Soil Science*. 1978. № 8. P. 1–64.

35. **Cheng J., Zhang S., Fang C., Ma L., Duan J., Fang X., Li R.** Removal of heavy metal ions from aqueous solution using biotransformed lignite // *Molecules*. 2023. Vol. 28, No. 13. Article No. 5031. <https://doi.org/10.3390/molecules28135031>.

36. **Chen Z., Li Y., Hu M., Xiong Y., Huang Q., Huang G.** Soil aggregate stability helps construct a stable nitrogen fixation system in lignite-based amendment-driven saline-sodic soil remediation // *Soil and Tillage Research*. 2024. Vol. 240. Article 106090. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106090>.

37. **Zhao Y., Naeth M.A.** Lignite derived humic products and cattle manure biochar are effective soil amendments in cadmium contaminated and uncontaminated soils // *Environmental Advances*. 2022. Vol. 8. Article 100186. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100186>.

38. **Piccolo A., De Martino A., Scognamiglio F., Ricci R., Spaccini R.** Efficient simultaneous removal of heavy metals and polychlorobiphenyls from a polluted industrial site by washing the soil with natural humic surfactants // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol.

28. P. 25748–25757. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12508-x>.

39. Cheng Y., Wen T., Zhou W., Yuan Y., Sun R. Surface-loaded magnesium and phosphorus-modified lignite adsorbents: Efficient adsorption and immobilization

for remediation of Cd-contaminated water and soil // *Environmental Technology & Innovation*. 2023. Vol. 32. Article 103442. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103442>.

Рукопис надійшов до редакції 17.06.2025 р.

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-3-12-20

Specialty 161. U.D.C. 661.183:504.53

SORBENTS BASED ON BROWN COAL AND ITS PROCESSING PRODUCTS: REVIEW

© S.V. Pyshyev¹, Yu.V. Lypko², M.E. Shved³, M.V. Nyvkevych⁴

Lviv Polytechnic National University, 79013, 12 S. Bandera St., Lviv, Ukraine

¹ Pyshyev Serhiy V., Doctor of Technical Sciences, Prof., Prof. of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing (DCTOGP), e-mail: serhii.v.pyshiev@lpnu.ua

² Lypko Yuriy V., Ph.D. in Technical Sciences, Junior Researcher of DCTOGP, e-mail: KhTNH.dept@lpnu.ua

³ Shved Maria Ye., Ph.D. in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Information Security, e-mail: zi.dept@lpnu.ua

⁴ Niykevych Maksym V., student of the Department of Chemical Technology and Engineering, e-mail: KhTNH.dept@lpnu.ua

The article provides a comprehensive analytical review of modern scientific approaches to the use of brown coal (lignite) and its processing products as effective sorption materials for cleaning up polluted environments. It reveals the physicochemical characteristics of lignite that determine its high sorption activity, in particular its porous morphology, the presence of functional groups (carboxyl, phenolic, hydroxyl), and its pronounced ion exchange capacity. The results of experimental studies confirming the effectiveness of brown coal in removing toxic heavy metal ions (Cr(VI), Cd(II), Cu(II), Fe²⁺, Ni, Pb, Zn) from aqueous environments, as well as its ability to stabilize contaminated soils, are summarized.

Particular attention is paid to humic acids as one of the most promising derivatives of brown coal. Humic acids isolated from lignite, due to their high-molecular polyelectrolyte nature, the presence of numerous functional groups (carboxyl, phenolic, hydroxyl) and the ability to chelate with metal ions, demonstrate high efficiency in removing heavy metals from aquatic and soil environments. The mechanisms of sorption, in particular ion exchange, complex formation, hydrophobic interaction and pseudomicellar organization, which determine the high selectivity and sorption capacity of humates, are analyzed.

The practical aspects of introducing lignite sorbents into technological solutions for purifying natural and waste water, as well as soil, were also analyzed, both as separate sorption agents and in combination with other natural materials, in particular modified zeolites. It is emphasized that brown coal-based sorbents are characterized by low cost, high availability, environmental safety and regenerative capacity, which determines their potential for use in environmental remediation and sustainable management of man-made waste.

Keywords: brown coal, lignite, humic acids, sorbents, heavy metals, ions, soil remediation.

Corresponding author: S.V. Pyshyev, e-mail: serhii.v.pyshiev@lpnu.ua

Manuscript received 2025/06/17

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-3-20-27

Спеціальність 161. УДК 504.03+62.8.5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВУГЛЕПОРОДНИХ ВІДВАЛІВ ШАХТ ПІВНІЧНОГО ДОНБАСУ

© О.М. Касімов¹

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

О.А. Атаманюк²

ТОВ «ЦЕНТР ЕКОЛОГІЇ ТА РОЗВИТКУ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ», 01032, м. Київ, вул. Гетьмана Павла Скоропадського, б.33, оф.75, Україна

¹ Касімов Олександр Меджитович, докт. техн. наук, проф., зав. науково-технічного відділу, e-mail: kassimov2011@gmail.com

² Атаманюк Олексій Анатолійович, канд. техн. наук, головний спеціаліст відділу екології, e-mail: alex.ataman888@gmail.com

Досліджено процеси виникнення вогнищ самозаймання вуглепородних відвалів Північного Донбасу, визначено склад токсичних газів, що виділяються при горінні, серйозно забруднюють всі сфери навколишнього середовища і не дозволяють рекультивувати вуглепородні відвали шляхом їх зниження та утилізації цінних компонентів з їхнього обсягу без відповідності.

Встановлено вогнища горіння та температури в обсязі одного з вуглепородних відвалів у діапазоні 50-409°C. показано, що на обстеженій шахті при горінні середнього за обсягом вуглепородного відвалу відбувається особливо небезпечне явище епізодичного займання, що призводить до появи в його об'ємі слабких розчинів сірчаної, вугільної та інших кислот.

У середньому з 1 т гірської маси, що горить, відвалів шахт Донбасу виділяється 10,8 кг CO; 0,5 кг SO₂. Навіть у згаслих відвалах ці з'єднання зберігаються тривалий час. Вогнища надзвичайно небезпечної та небезпечної категорій характеризуються складною будовою та займають значні території. Вони мають один або кілька епіцентрів, що відповідають розташування джерел освіти та розміщення вміщуючих та сунутніх порід.

При цьому в атмосферу в районі обстеженої шахти надходить т/рік: SO₂ – 168,6; Zn – 91,3; NO_x – 14; H₂S, вуглеводні, сполуки Hg, Be, Co, HCN. Аналіз поширення небезпечних забруднюючих речовин, у т. ч., сполук важких і рідкісних металів, показує, що у ґрунтах регіону зафіксовано перевищення ГДК за змістом: Zn (до 435 ГДК), As (до 100 ГДК), Pb (56 ГДК), Cd (до 1).

Запропоновано ряд недефіцитних та дешевих рецептур для створення захисних шарів антиоксидантів (антипірогенів), що запобігають доступу кисню до вогнищ горіння вуглепородних відвалів та утворення токсичних газоподібних сполук, а також перешкоджають вторинному пиленню з поверхні вуглепородного відвалу, що горить.

Ключові слова: вуглецеві відвали, терикони, горіння відвалів, антиоксиданти, забруднення навколишнього середовища, температура в осередках горіння, антипірогени.

Автор для листування О.М. Касімов, e-mail: kassimov2011@gmail.com

На підприємствах України з 2,0-2,5 млрд т/рік використовуваних природних ресурсів $\approx 90\%$ перетворюється на великотоннажні промислові відходи (ПВ). Вони розміщені в шламонакопичувачах, териконах, відвалах, площа яких становить 180 тис. га та зростає на 3-6 тис. га/рік. Основні джерела утворення ПВ – підприємства енергетичної галузі, гірничо-металургійного комплексу. Загальний обсяг накопичених ПВ становить >39 млрд т [1-5]. Питома вага ресурсомістких галузей в економіці України сягає $\approx 61\%$ ВВП, тоді як у країнах ЄС вона дорівнює в середньому 34%.

Динаміка зростання кількості обсягів ПВ у регіоні Північного Донбасу свідчить, що ця проблема може призвести до небезпечних екологічних наслідків. Тут налічується понад 300 вуглепородних відвалів (ВПВ). Характерні параметри териконів біля вугільних шахт: висота – 40-60 м; площа основи – 10-20 тис. м²; крутість укосів – 25-28° з боку подачі породи та 37-40° з лобового боку; обсяг заскладованих порід – 300-500 тис. м³; щільність порід – 1,8-2,2 кг/дм³; вологість – 5-8%. Кам'яновугільні відкладення відносяться до свити карбону та представлені пісковиком – 35-39%; алевролітами – 35-40%; аргілітами – 15-20%; вапняками – 1,2-1,8%. Саме вплив ВПВ на довкілля полягає у забрудненні (рис. 1, 2):

- атмосфери при виділенні з відвальної маси токсичних газів та пилу;
- ґрунтових вод та водних об'єктів за рахунок змиву солей з поверхні ВПВ;
- ґрунтів і ґрунтів солями, що змиваються з укосів відвалів.

При цьому з господарського обороту вилучаються землі під розміщення породних відвалів (по об'єднанню «Ровенькиантрацит» загальна площа, яку займають ВПВ, становить 186,7 га, причому відпрацьовані займають 138 га)

та прилеглих площ, забруднених породою з укосів відвалу при обсіпаннях, зсувах та водноерозійних процесах. Фізико-хімічні процеси, що протікають у палаючих відвалах, призводять до інтенсивного виділення токсичних газів.

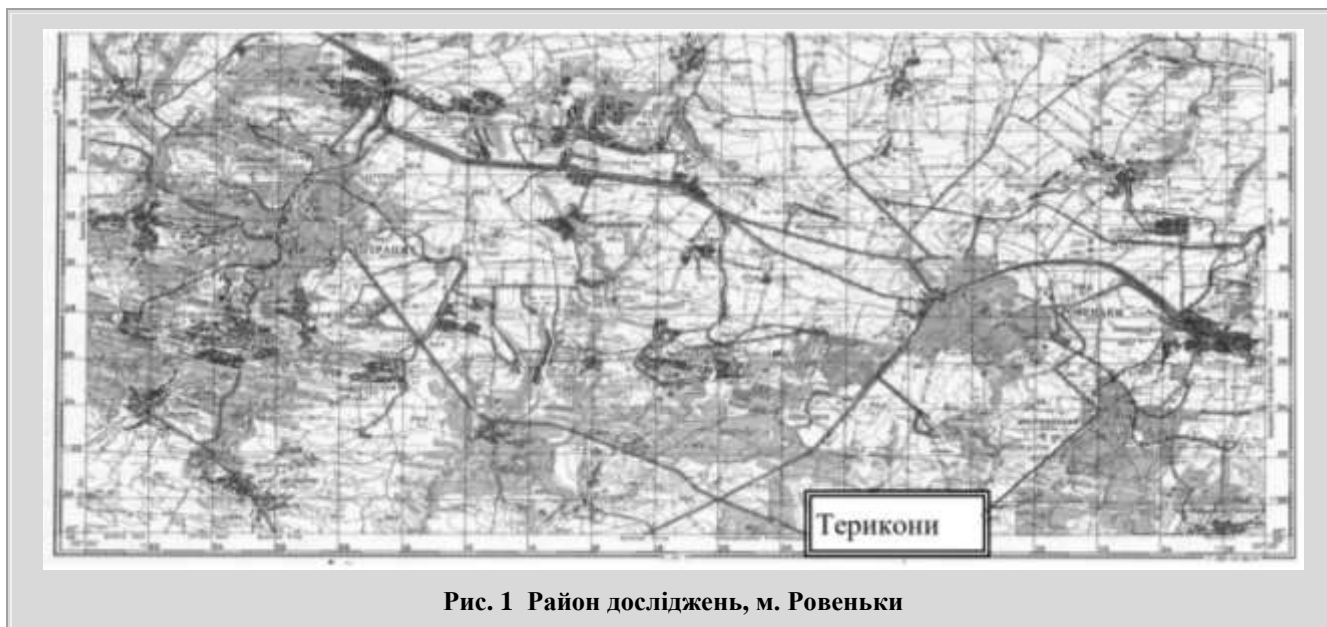


Рис. 1 Район досліджень, м. Рівеньки

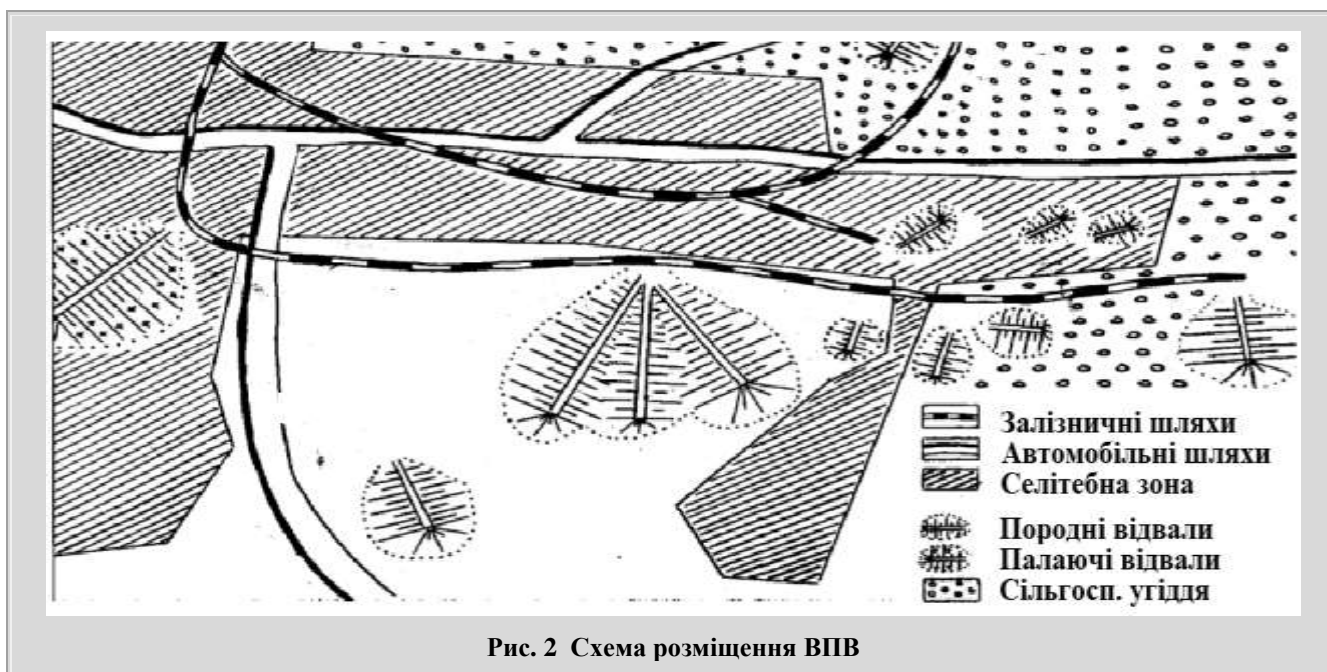
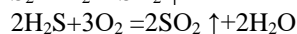
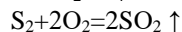
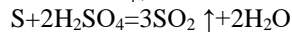
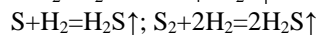
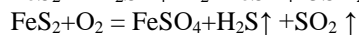
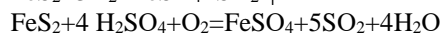
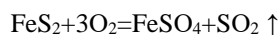
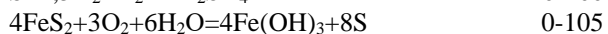
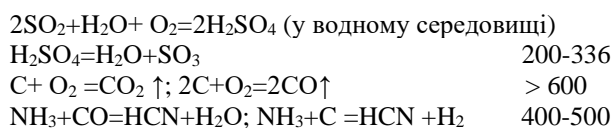


Рис. 2 Схема розміщення ВПВ

Утворення токсичних сполук при горінні породних отвалів протікає за наступними реакціями (праворуч надано температурний інтервал протікання реакцій, °C):

$2\text{FeS}_2 + 7,5\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ (за участі тіонових бактерій)





Вимірювальні свердловини на ВПВ, обстеженому авторами, були обладнані згідно «Інструкції щодо попередження самозаймання, гасіння та розбирання породних відвалів» [6, 7] у 6-ти точках заміру температури та розміщені за схемою, наданою на рис. 3. Додаткові точки вимірів розміщувалися в передбачуваних чи видимих осередках самонагрівання. Точки з індексом А – на позначці + 10м; точки з індексом Б – на позначці + 20м; точки з індексом В – на позначці + 30м; точки з індексом Г – на позначці + 40м; точки № 9Д і 18Д відповідають вершинам терикону. Площа складування порід – 32 340 м². Об'єм порід – 603480 м³. ВПВ був запущений 1946 р., закритий 1969 р., складається з 2-х конічних териконів заввишки 44 і 57 м. У табл. 1. наведено результати вимірювання температури в 27-ми

точках недіючого ВПВ № 4 шахти ДП «Ровенькиантрацит». Вимірювання температур на поверхні вели пірометрами «Радан» на глибині >0,5 м штангами з алюмель-хромелевими термопарами.



Рис. 3 Схема розташування точок вимірювання температури в тілі терикону

Таблиця 1

Вимірювання температури недіючого терикону

№ скважин	Температура на глибині, м, °С									
	Зовнішнє повітря	0,1	0,5	1,5	2,5	№ скважин	0,1	0,5	1,5	2,5
1А	28	27	25	24	26	5Б	31	28	30	34
1Б	28	28	26	25	27	5В	32	36	39	41
1В	28	72	112	136	182	5Г	33	52	71	98
1Г	30	30	28	36	39	6А	31	27	26	24
2А	30	30	26	28	30	6Б	32	28	26	25
2Б	30	29	27	29	28	6В	33	34	37	36
2В	32	37	57	64	82	6Г	32	36	38	40
2Г	30	30	28	27	29	7А	31	30	32	35
3А	30	30	26	28	29	7Б	30	29	28	26
3Б	30	29	27	29	33	7В	51	64	61	77
3В	32	31	29	31	37	7Г	53	60	64	72
3Г	33	31	40	43	47	8А	32	27	29	28
4А	33	32	28	30	33	8Б	30	28	29	31
4Б	33	31	29	31	30	8В	33	34	32	29
4В	33	33	29	30	31	8Г	34	36	28	29
4Г	33	38	40	43	46	9Д	148	238	319	409
5А	32	30	29	32	31	18Д	130	247	338	355

Загалом 34 точки, на кожній з яких виконано 4 виміри

Особливо небезпечне явище навіть епізодичного займання ВПВ, що призводить до появи в їх об'ємі слабких розчинів H₂SO₄ та ін кислот. Навіть у згаслих відвалах ці з'єднання зберігаються тривалий час. Вогнища надзвичайно небезпечної категорії характеризуються складною будовою та займають значні території. Вони мають один або кілька епіцентрів, що відповідають розташуванню джерел утворення та розміщення ПВ.

У середньому з 1 т гірничої маси, що горить, відвалів шахт Донбасу виділяється 10,8 кг СО, 0,5 кг SO₂. Палаючий відвал середніх розмірів виділяє протягом року в атмосферу до 5 тис. т оксиду вуглецю [8-9]. Аналіз поширення поллютантів ПВ показує, що у ґрунтах регіону зафіксовані перевищення ГДК ПВ за вмістом: Zn – до 435 ГДК, As – до 100 ГДК, Pb – до 56 ГДК, Cd – до 125 ГДК. На балансі обстеженої шахти знахо-

дяться 11 породних відвалів, які забруднюють атмосферу викидом $\approx 5,3$ т/рік вуглепородного пилу. На обстеженій шахті є ВПВ, що горить. У цьому атмосферу поступає, т/рік: SO_2 – 168,6; Zn – 91,3; NO_x – 14, а також H_2S , пари H_2SO_4 та HCN (див. табл. 2).

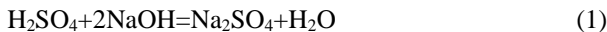
Таблиця 2

Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ при горении ВПВ

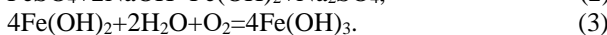
Речовина	Об'єм викидів, т/рік
Сірчистий ангідрид	168,4
Оксид вуглецю	91,4
Діоксид нітрогену	14,0
Сірководень	5,05

Гасіння відвалу, що горить, проводять шляхом періодичного ущільнення породи бульдозерами. Цей захід дає короточасний ефект і не є ефективним. Нижче розглянуто більш еколого-економічно вигідні заходи щодо нейтралізації ПВ гасіння палаючого відвалу та попередження його самозаймання. Сукупність метеофакторів району часто сприяє створенню умов, за яких інтенсивність повітрообміну в приземному шарі атмосфери незначна, у результаті виникає температурна інверсія. При цьому концентрація шкідливих речовин в атмосфері досягає дуже високих значень, що веде до негативного впливу на людину.

Запобігти саморозігріванню вологих гірничих порід можна прямою дією на них розчинами NaOH чи KOH . При цьому позитивний ефект досягається завдяки декарбонізації порових розчинів і нейтралізації сірчаної кислоти:



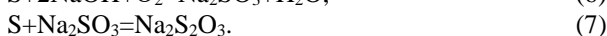
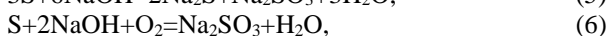
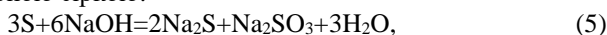
та окисненню Fe^{2+} :



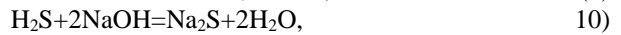
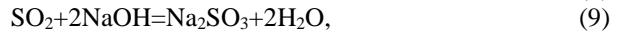
У цьому випадку відбувається взаємодія лугу з окисним вилуговуванням піриту сульфатом, що бере участь Fe^{+3} :



У несприятливому лужному середовищі за відсутності джерел вуглецю та енергії тіонові бактерії *Thiobacillus ferrooxidans* не можуть розвиватися. У зв'язку з цим у вологих гірських породах неможливі біохімічні процеси окисного вилуговування піриту. При прямому впливі розчинів лугів на гірську породу, що саморозігрівається, відбувається взаємодія їх із зазначеними вище речовинами, новоутвореннями і елементарною сіркою:



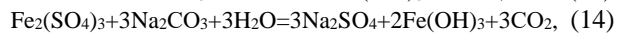
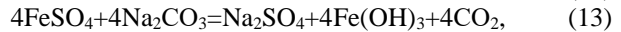
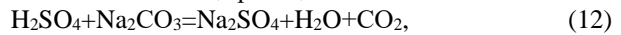
В джерелах горіння гірських порід луги можуть взаємодіяти як із CO_2 , так і з іншими газоподібними речовинами. При використанні NaOH протікають реакції:



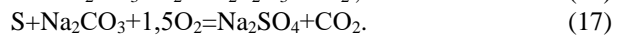
а за надлишку сірководню:



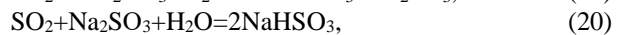
Також мають місце реакції:



Вплив Na_2CO_3 на відвальну породу, що саморозігрівається, призводить до зв'язування елементарної сірки, котра міститься в ній:

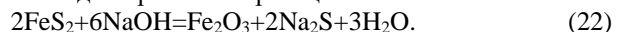


Таким чином, саморозігрів відвальної породи стає неможливим через відсутність у ній елементарної сірки. В осередках горіння відвальних порід карбонат натрію може взаємодіяти з газоподібними речовинами:



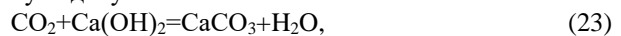
На практиці для зв'язування шкідливих газів використовують розбавлений 1-3 % водний розчин NaOH і Na_2CO_3 . Їх можна ефективно використовувати для придушення процесів саморозігріву гірських порід, зрощення їх поверхні для поглинання шкідливих газів і ліквідації осередків горіння шляхом активного охолодження їх розчинами і зв'язування речовин, що знову утворюються, котрі беруть участь в окислювально-відновних реакціях.

За температури $T > 250$ °C NaOH реагує з піритом. Оптимальне вилуговування піриту досягається за 400 °C внаслідок протікання реакції:

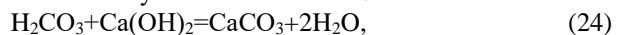


За цих температур при дії на пірит 2,5 % розчином NaOH протягом 1-2 годин з нього переходить у розчин 94 % сірки. Розчини NaOH і NaHCO_3 взаємодіють із елементарною сіркою, що міститься у вугіллі ($\text{S}_{\text{елем}}$) навіть за нормальних умов. Дія на вугілля протягом 1 доби 3 %-них розчинів NaOH і NaHCO_3 знижує в 10 і більше разів вміст у ньому $\text{S}_{\text{елем}}$ з відповідним зростанням вмісту сульфатної сірки ($\text{S}_{\text{сульф}}$).

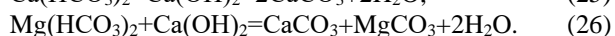
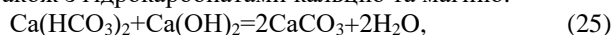
Висока ефективність використання гашеного вапна для профілактики самозаймання відвальних порід пояснюється особливостями її впливу на їх тверду фазу. Гідроксид кальцію може також взаємодіяти з розчиненим у воді вуглекислим газом:



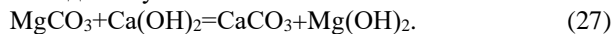
з вільною вугільною кислотою:



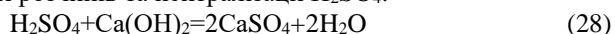
а також з гідрокарбонатами кальцію та магнею:



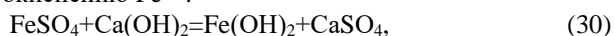
За надлишку вапна:



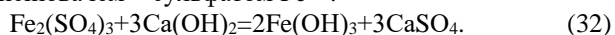
За перебігу цих реакцій утворюються та випадають у осад CaCO_3 і $\text{Mg}(\text{OH})_2$. У водному середовищі при додаванні $\text{Ca}(\text{OH})_2$ відсутня вугільна кислота. У такій воді неможлива активна життєдіяльність тіонових бактерій. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ може бути використаний для запобігання/пригнічення процесів саморозігріву пірит-містких порід. Ефект досягається завдяки декарбонізації порових розчинів та нейтралізації H_2SO_4 :



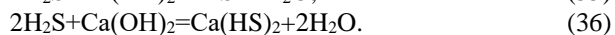
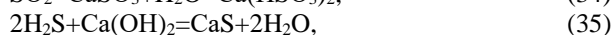
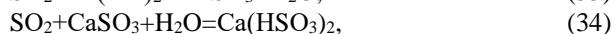
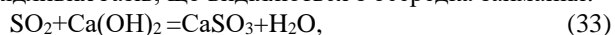
та окисненню Fe^{+2} :



Гідроксид кальцію взаємодіє в розчинах з сильним окиснювачем – сульфатом Fe^{+3} :



$\text{Ca}(\text{OH})_2$ характеризується температурою диссоціації $T_{\text{дисс.}} \approx 540$ °C і може використовуватися у вигляді суспензії для гасіння відвалів, що горять. При цьому відбувається охолодження порід рідиною та поглинання шкідливих газів, що виділяються з осередка займання:



При висиханні суспензії $\text{Ca}(\text{OH})_2$, що міститься в ній, кристалізується. При хімічних реакціях кристали карбонату та гідроксиду кальцію й уламки породи зростаються між собою, що призводить до ущільнення речовини, котра заповнює проміжки між частинками породи. Це виключає можливість саморозігріву.

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – екологічно чиста речовина, тому не встановлено санітарним норми, що обмежують скидання його розчинів і суспензій в довкілля. У природних умовах відбувається швидка нейтралізація $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при взаємодії його із CO_2 атмосферного повітря. В результаті утворюється CaCO_3 , не небезпечний для здоров'я людини. Дослідження ПВ показали, що при відсіпанні поверхневих шарів ПВ відвалів доцільно додавати до відвальної породи відходи виробництва вапна або нешкідливий вапняний будівельний щебінь для довгострокового регулювання рН середовища у відвалі.

Для придушення горіння і викидів забруднюючих речовин на ВПВ проводять профілактику їх самозаймання. Для цього на поверхні ВПВ створюється захисний шар антипірогену, що запобігає доступу кисню та утворенню токсичних сполук. Плівкоутворюючі антипірогени – це речовини, що формують на поверхні відвалу суцільну плівку, що має достатню міцність, еластичність, хорошу адгезію, стійкість до впливу вологи. Утворення на поверхні ВПВ суцільної плівки з речовин, що наносяться, виключає біохімічне і хімічне окиснювальне вилугування FeS_2 і вторинне пиловиділення з поверхні ВПВ.

Таблиця 3

Плівкоутворювальні суміші для гасіння відвалів, що горять (у всіх сумішах H_2O до 100 %)

№ суміші	Компоненти суміші	Вміст у водному розчині, %
1	Рідке скло	27-29
	Доломітовий пил	20
2	Шамотно-каоліновий порошок	18
	50 %-ва водна полівінілацетатна дисперсія	24
	Сульфонол НП-3	9
3	Вуглекислий кальцій	40
	50 %-ва водна полівінілацетатна дисперсія	30
4	Карбамідно-формальдегідна смола	75
	Сульфонол НП-3	3
	Алюміній сірчаноокислий	0,1
5	Карбамідно-формальдегідна смола	40-75
	Бішофіт	18
	Сульфонол НП-3	2

Для цього використовують водні розчини природних та синтетичних смол і рідкого скла окремо та в комбінаціях з наповнювачами, модифікаторами та ін. добавками. Ефективність захисної дії плівки залежить від композиції, що змочує, тобто від швидкості і глибини проникнення рідини в пори вугілля. Практично все

вугілля і всі породи гідрофобні, тому для поліпшення ефективності обробки ВПВ розчини додають змочувачі.

Як ефективні покриття для профілактики самозаймання ВПВ рекомендуються композиції на основі карбамідно-формальдегідної смоли, полівінілацетатної суміші та гелеутворюючі композити на основі рідкого

скла. Вони мають добру адгезію, не змиваються водою, утворюють на поверхні еластичні повітронепроникні плівки. У зв'язку з тим, що вони наносяться на поверхню у вигляді тонкої плівки (до 0,5 мм), одним з їх найважливіших показників є кінетична в'язкість.

Гасіння ВПВ, що горять, провадять за допомогою впорскуванням пульпи з антипірогенних матеріалів і заливання шару породи пульпою через траншеї, зроблені бульдозером в охолоджуваній породі. Склади плівкоутворювальних сумішей, розроблених авторами, наведені в табл. 3 [10, 11].

Висновки

1. Хімічний і мікроелементний склад ВПВ залежить від віку відпрацьованих вугілля і порід, що вміщують їх, ступеня метаморфізму, що визначається будовою району. Обсяг і характер виділень у навколишнє середовище залежить від розміру та форми відвалу, хімічного та петрографічного складу матеріалу, що складається, вмісту горючих компонентів. Основну небезпеку здоров'ю людини становлять палаючі відвали.

2. На обстеженому породному відвалі виявлено чотири горіння 1В; 2В; 5Г; 7В; 7Г; 9Д; 18Д з температурою від 50 до 409 °С, що свідчить про те, що даний породний відвал є палаючим.

3. Запропоновано до впровадження плівкоутворювальні антипірогени, що формують на поверхні відвалу суцільну плівку, що має достатню міцність, еластичність, хорошу адгезію, стійкість до впливу вологи. Утворення на поверхні ВПВ суцільної плівки з речовин, що наносяться, виключає біохімічне і хімічне окисне вилуговування FeS₂ і, відповідно, запобігає саморозігріву і займанню вуглепородних відвалів.

Библиографический список

1. **О.А. Атаманюк.** Аналіз та перспективи окремих систем охорони навколишнього середовища на вугледобувних та вуглепереробних підприємствах України / **О.А. Атаманюк, О.М. Касімов** // Вуглехімічний журнал. – 2021. – № 5. – С. 15-25. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2021-0-5-15-25>.

2. **Касімов О.М.** Вплив породних відвалів вугледобувних підприємств і вугільних ТЕС України на стан навколишнього природного середовища / **О.М. Касімов,**

О.Л. Борисенко // Вуглехімічний журнал. – 2019. – № 5. – С. 24-33. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2019-0-5-24-33>.

3. **Касімов О.М.** До питання розробки інноваційних еколого-економічних технологій утилізації промислових відходів / ХНУ ім. В.Н. Каразіна. зб. матер. III науков. конференції Гидрогеологія: наука, освіта, практика. Вип. 1 / **А.М. Касімов.** – 2018. – С. 87-89.

4. **Касімов О.М.** Відходи та викиди електростанцій України, що працюють на твердому паливі / **О.М. Касімов, І.В. Удалов** // Вуглехімічний журнал. – 2018. – № 6. – С. 12-21.

5. **Борисенко О.Л.** Управління відходами вуглезбагачувальних фабрик України та оцінка еколого-економічної ефективності природоохоронних заходів при зберіганні відходів / **О.Л. Борисенко, О.М. Касімов** // Вуглехімічний журнал. – 2020. – № 1. – С. 16-24. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2020-0-1-16-24>.

6. Інструкція із запобігання самозапалюванню, гасіння та розбирання породних відвалів / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=46975

7. Породні відвали вугільних шахт і збагачувальних фабрик. Вимоги до формування, запобігання самозайманню, розбирання і гасіння / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0526644-07#Text>.

8. **Касімов О.М.** Вивчення хімічного складу вугілля ряду шахт та збагачувальних фабрик України та перспективи утилізації вугільних відвалів / **О.М. Касімов** // Вуглехімічний журнал. – 2018. – № 5. – С. 16-25.

9. **Касімов О.М.** Екологічний вплив відходів електростанцій України, які працюють на твердому паливі / **О.М. Касімов, І.В. Удалов.** // Зб. наук. пр. ХНУ ім. В.Н. Каразіна. – 2018. – С. 87-89.

10. **Семиноженко В.П.** Промислові відходи: проблеми та шляхи вирішення / **В.П. Семиноженко, О.М. Касімов [та ін].** – Харків: Індустрія, 2011. – 510 с.

11. **Касімов О.М.** Теоретичні засади екологічного моніторингу. Навчально-методичний посібник / **О.М. Касімов, М.М. Козуля.** – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – 176 с.

Рукопис надійшов до редакції 02.07.2025 р.

O.A. Atamanyuk²

LLC 'CENTRE FOR ECOLOGY AND DEVELOPMENT OF NEW TECHNOLOGIES', 01032, Kyiv, 33 Hetmana Pavla Skoropadskoho St., office 75, Ukraine

¹ Kasimov Oleksandr Medzhitovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Science-Technical Department, e-mail: kassimov2011@gmail.com

² Atamanyuk Oleksiy Anatoliyovych, Ph.D. in Technical Sciences, Chief Specialist of the Ecology Department, e-mail: alex.ataman888@gmail.com

The processes of spontaneous combustion in coal waste dumps in the Northern Donbas region have been studied, and the composition of toxic gases emitted during combustion has been determined. These gases seriously pollute all areas of the environment and prevent the recultivation of coal waste dumps by reducing their volume and utilising valuable components from them without compliance.

The foci of combustion and temperatures in the volume of one of the coal waste dumps were established in the range of 50-409 °C. It has been shown that at the surveyed mine, during the combustion of an average-sized coal waste dump, a particularly dangerous phenomenon of episodic ignition occurs, leading to the appearance of weak solutions of sulphuric, carbonic and other acids in its volume.

On average, 10.8 kg of CO and 0.5 kg of SO₂ are emitted from 1 tonne of burning rock mass in the Donbas mine dumps. Even in extinct dumps, these compounds remain for a long time. Extremely dangerous and dangerous categories of fires are characterised by a complex structure and occupy significant areas. They have one or more epicentres corresponding to the location of the sources of ignition and the location of containing and associated rocks.

At the same time, the following substances are released into the atmosphere in the area of the surveyed mine per year: SO₂ – 168.6; Zn – 91.3; NO_x – 14; H₂S, hydrocarbons, Hg, Be, Co, HCN compounds. Analysis of the spread of hazardous pollutants, including compounds of heavy and rare metals, indicates that the region's soils exceed the maximum permissible concentrations for: Zn (up to 435 MPC), As (up to 100 MPC), Pb (56 MPC), Cd (up to 1).

A number of inexpensive and readily available recipes have been proposed for creating protective layers of antioxidants (antipyrogens) that prevent oxygen from reaching the combustion sites of coal waste dumps and the formation of toxic gaseous compounds, as well as prevent secondary dusting from the surface of a burning coal waste dump.

Keywords: coal dumps, slag heaps, burning dumps, antioxidants, environmental pollution, temperature in combustion cells, antipyrogens.

Corresponding author: O.M. Kasimov, e-mail: kassimov2011@gmail.com

Manuscript received 2025/07/02

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-3-27-36

Спеціальність 161. УДК 621.763:621.893

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА ХІМІЧНИХ РЕАГЕНТІВ НА ХІМІЧНОСТІЙКИЙ КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ

© Б.К. Артищенко¹, А.Б. Григоров²

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

¹ Артищенко Богдан Костянтинович, аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива (КТПНГТП), e-mail: artyshchenkobogdan@gmail.com

² Григоров Андрій Борисович, докт. техн. наук, проф., проф. КТПНГТП, e-mail: grigorovandrey@ukr.net



В статті представлені результати дослідження негативного впливу, який чинять різні агресивні середовища (відпрацьована олива, нафтовий шлам, кислий гудрон та фенольні стічні води) та хімічні реагенти (50 % водний розчин H_2SO_4 та 30 % водний розчин KOH) на полімервмісний хімічностійкий композиційний матеріал (ХСКМ), отриманий на базі відходів та вторинних продуктів нафтопереробної та коксохімічної галузей промисловості України. Проаналізовано руйнівний вплив на конструкційні матеріали присадок, смолисто-асфальтенових речовин, лугів, органічних та мінеральних кислот, фенолів, які містяться в складі відходів виробництва і очищення товарних та відпрацьованих нафтопродуктів, промислових стічних вод. Запропоновано структурну схему отримання ХСКМ для подальших лабораторних досліджень. Реалізуючи означену схему, було отримано дві композиції: А (50 % (PET, HDPE) + 30 % (Пісок) + 10 % (Коксовий пил) + 5 % (відпрацьована олива SAE 15W-40) + 5 % (Каолін)) та Б (50 % (PET, HDPE) + 25 % (Пісок) + 15 % (Зола) + 5 % (відпрацьована олива SAE 15W-40) + 5 % (Каолін)). Саме на цих композиціях, у статичних умовах дослідження (тривалість 12 місяців, температура середовища 25 °С), визначався негативний вплив агресивних середовищ на ХСКМ. Встановлено, що цей вплив проявляється у зниженні величини міцності при стисканні (в залежності від композиції та агресивного середовища з 36(28) МПа до 28-35 (18-27) МПа) та збільшенні маси зразка Δm (в залежності від композиції та агресивного середовища на 0,01-0,14 або на 0,03-0,21). Визначено, що запропоновані зразки ХСКМ проявляють високу стійкість до дії таких агресивних хімічних реагентів, як 50 % водний розчин H_2SO_4 (зміна відношення висоти зразка до діаметра (H/D) склала 7,6 % для композиції А) та 10,0 % для композиції Б) та 30 % водний розчин KOH (зміна H/D склала 12,8 % для композиції А та 15,6 % для композиції Б). Подібна висока стійкість ХСКМ до дії агресивних середовищ та хімічних реагентів робить їх дуже перспективним матеріалом для застосування на нафтопереробних та коксохімічних заводах замість залізобетонних конструкцій у системах біологічного очищення стічних вод і водовідведення, на виробничих майданчиках, місцях зберігання відходів виробництва.

Ключові слова: нафтопереробна та коксохімічна промисловість, композиційний матеріал, хімічна стійкість, переробка, полімери, нафтовий шлам, кислий гудрон, коксовий пил, зола, фенольні стічні води.

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

Наразі хімічностійкі композиційні матеріали (ХСКМ) на основі полімерів можна розглядати як досить перспективний матеріал, який знаходить своє широке застосування в різних галузях промисловості України. Як одну з основних галузей застосування ХСКМ слід розглядати нафтопереробну та коксохімічну промисловість, які мають стратегічне значення для розвитку обороноспроможності та енергонезалежності України. Причому, застосування ХСКМ різних ділянок нафтопереробних (НПЗ) та коксохімічних (КХЗ) заводів дозволить значно підвищити ефективність виробництва основних продуктів – товарних нафтопродуктів та доменного коксу – в наслідок забезпечення високої експлуатаційної надійності заводського обладнання, комунікацій тощо.

Відомо, що в умовах НПЗ та КХЗ контакт конструкційних матеріалів з різними агресивними середовищами та хімічними реагентами відбувається, по-перше, при штатному режимі проведення технологічного процесу, по-друге – при виникненні аварійних ситуацій [1-3]. Тобто, стійкість до дії цих речовин є основною вимогою щодо запобігання виникненню проявів деструктивних процесів у різних конструкціях та системах, які здатні призвести до їх руйнування різних ступенів тяжкості. Номенклатура речовин, які чинять найбільший негативний вплив на конструкційні матеріали, що використовуються у промисловості, надаємо у вигляді структурної схеми (див. рис. 1).

Нижче надано наявність означених вище речовин в агресивних середовищах цільових та побічних продуктів переробки вуглеводневої сировини (нафти або газового конденсату) та кам'яного вугілля, а також імовірні місця їх контакту з конструкційними матеріалами в умовах НПЗ та КХЗ.

Присадки є невід'ємною частиною будь-якого товарного палива (моторного, технологічного, котельного, морського) або змащувального матеріалу (змащувальних олів та пластичних мастил) [4]. Їх вводять для поліпшення таких експлуатаційних властивостей товарної продукції, як антидетонаційні, депресорні, антиокислювальні, диспергуючі, протизношувальні тощо [5, 6]. Контакт конструкційних матеріалів з присадками можливий на ділянці компаундування нафтопродуктів та резервуарному парку.



Рис. 1 Номенклатура речовин, які негативно впливають на конструкційні матеріали

Луги використовуються при обробці бензинової та дизельних фракцій з метою зниження їх кислотності, а також при контактній очистці кислого гудрону та відпрацьованих змащувальних олив [7]. Негативний вплив лугів на конструкційні матеріали відбувається на промислових майданчиках установок з виробництва моторного палива, переробки кислого гудрону та на установках регенерації змащувальних олив, при обробці очищувальних фільтрів, апаратів та стабілізації смол і конденсатів.

Смолисто-асфальтенові речовини містяться як у складі сирої нафти (до 3 % мас.) – сировині для виробництва різних нафтопродуктів [8], так і в побічних продуктах селективної очистки залишкових змащувальних олив – бітумах деасфальтизації [9]. Смолисто-асфальтенові речовини містять кислотні, сірчисті та кисневмісні групи, які сприяють: окисненню поверхні металів; утворенню хімічно агресивних комплексів; підвищенню електрохімічної корозії, особливо у вологих середовищах. Смолисто-асфальтенові речовини складають значну частину (до 30 %) [10] нафтових шламів – донних відкладень відстійників та резервуарів зберігання вуглеводневої сировини. Таким чином, смолисто-асфальтенові речовини здатні контактувати з конструкційними матеріалами на ділянках виробництва змащувальних олив та бітумів або в місцях зберігання сировини та відходів нафтопереробки – в нафтошламових озерах.

Органічні та мінеральні кислоти присутні в побічному продукті очищення відпрацьованих змащувальних олив від смолисто-асфальтенових речовин – кислому гудрону [11]. Загальний вміст у ньому сульфокислот (зокрема вільної сірчаної кислоти) становить до 60 % мас. [12, 13]. Такий продукт є особливо небезпечним продуктом нафтопереробки, що чинить негативний вплив на навколишнє середовище [14, 15] та руйнує конструкційні матеріали в місцях його тимчасового або постійного зберігання.

Мінеральні кислоти використовуються в умовах НПЗ та КХЗ при промиванні та кислотному очищенні обладнання, регенерації іонообмінних смол, нейтралізації залишкових лугів, знешкодженні хроматів або ціанідів (у спеціальних випадках) та в якості технологічних реагентів. Саме при реалізації цих процесів та при зберіганні відбувається їх контакт з конструкційними матеріалами.

Феноли відносяться до хімічно-активних речовини, що негативно впливають на конструкційні матеріали різного типу: метали, бетони, полімери, гуми, герметики, ущільнення тощо [16, 17]. Їх дія пов'язана з кислотністю, здатністю до окиснення та розчинення органічних речовин. Контакт конструкційних матеріалів з фенолами на КХЗ є серйозною технічною проблемою, оскільки феноли входять до складу фенольної води (концентрація фенолів до 2–5 г/дм³), сирого коксового газу, фракцій кам'яновугільної смоли та ін. Їх дія призводить до інтенсивного зношування й руйнування заводського обладнання. Основними зонами контакту обладнання з фенолами на КХЗ слід розглядати апарати охолодження коксового газу, відстійники фенольної води, сепаратори смоли, установки очищення аміачної води, трубопроводи, конденсатори-холодильники та збірники фракцій кам'яновугільної смоли тощо.

Крім означених вище технологічних операцій контакт між конструкційними матеріалами та агресивними середовищами, хімічними реагентами відбувається в системах біологічної очистки стічних вод та водовідведення.

Наразі одним з основних конструкційних матеріалів, що застосовується на НПЗ та КХЗ в цих системах, виступає залізобетон. Роботами [18-20] доведено, що зазначені вище агресивні середовища чинять на цей матеріал суттєвий руйнівний вплив. Цей вплив пов'язаний з проникненням речовин у пори бетону із зміненням його капілярної структури, що призводить до хімічного розширення та виникнення тріщин. Може

відбуватися розчинення цементного каменю та загальна фізико-хімічна деградація.

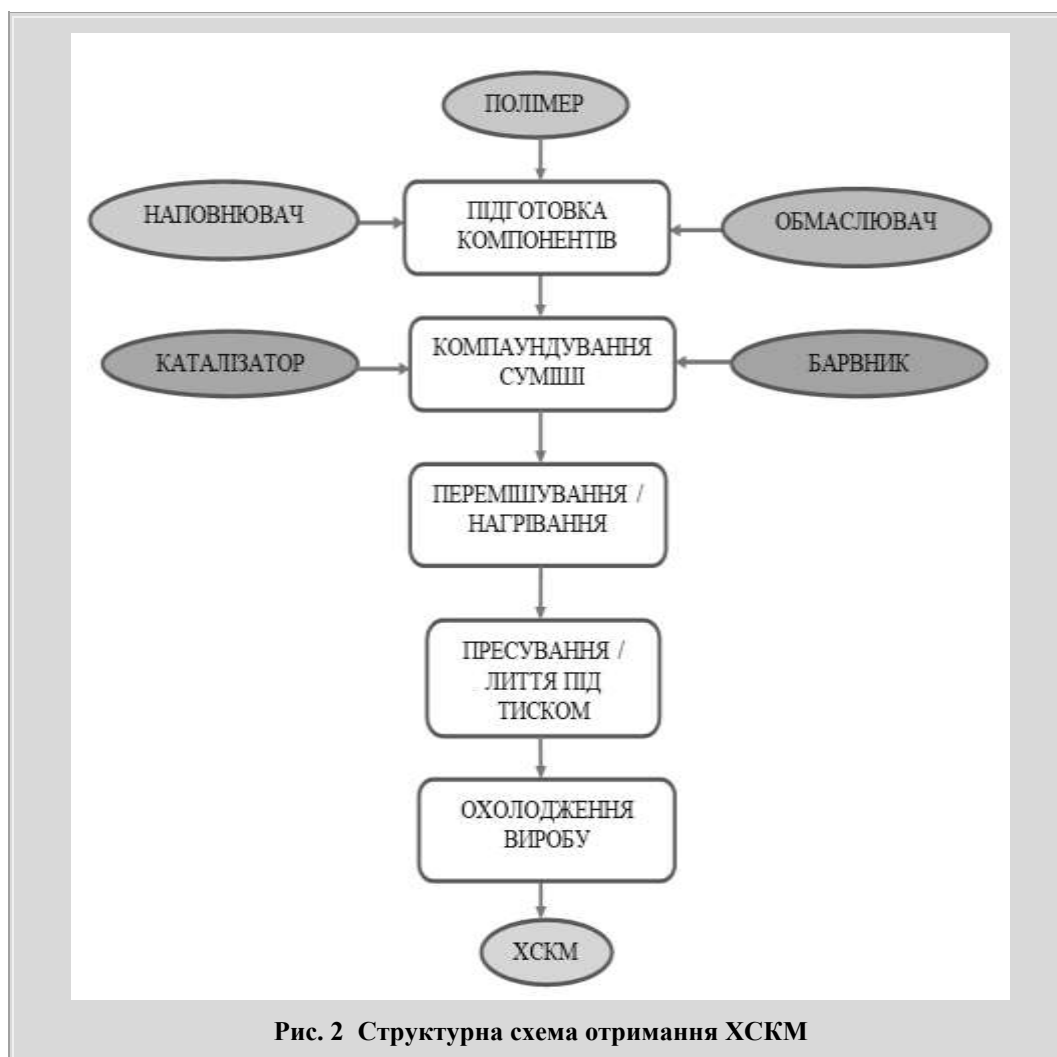
Таким чином, певного підвищення надійності функціонування НПЗ та КХЗ можна досягти за рахунок заміни (де це можливо) залізобетонних виробів на нові ХСКМ. Але при цьому необхідно провести дослідження щодо визначення ступеня негативного впливу різних агресивних середовищ та хімічних реагентів на стабільність властивостей та довговічність ХСКМ.

Для проведення лабораторних досліджень нами були виготовлені зразки ХСКМ, представлені двома раціональними (композиції зі збалансованими фізико-механічними показниками якості та хімічною стійкістю) композиціями:

– композиція А: 50 % (РЕТ, HDPE) + 30 % (Пісок) + 10 % (Коксовий пил) + 5 % (відпрацьована олива SAE 15W-40) + 5 % (Каолін);

– композиція Б: 50 % (РЕТ, HDPE) + 25 % (Пісок) + 15 % (Зола) + 5 % (відпрацьована олива SAE 15W-40) + 5 % (Каолін).

Як агресивні середовища було обрано відпрацьовану оливу (ВО), нафтовий шлам (НШ), кислий гудрон (КГ), фенольні стічні води (ФСВ). Хімічними реагентами, які приймали участь у дослідженні виступали 50 %-й водний розчин H_2SO_4 та 30 %-й водний розчин KOH. Досліджувані зразки ХСКМ були отримані в лабораторних умовах за принциповою схемою, що наведена на рис. 2.



Дослідження стійкості зразків ХСКМ у статичних умови передбачали довготривалий контакт ХСКМ та агресивного середовища при температурі 25 °С. Схему лабораторної установки для проведення статичних досліджень наведено на рис. 3.

Після проведення досліджень в статичних умовах для зразків ХСКМ, в залежності від тривалості дослідження (τ , год. (міс.)), були визначені наступні показники: міцність при стисканні ($\sigma_{ст}$, МПа); змінення маси

зразка (Δm , %); змінення діаметру зразка (ΔD , %) та змінення висоти зразка (ΔH , %).

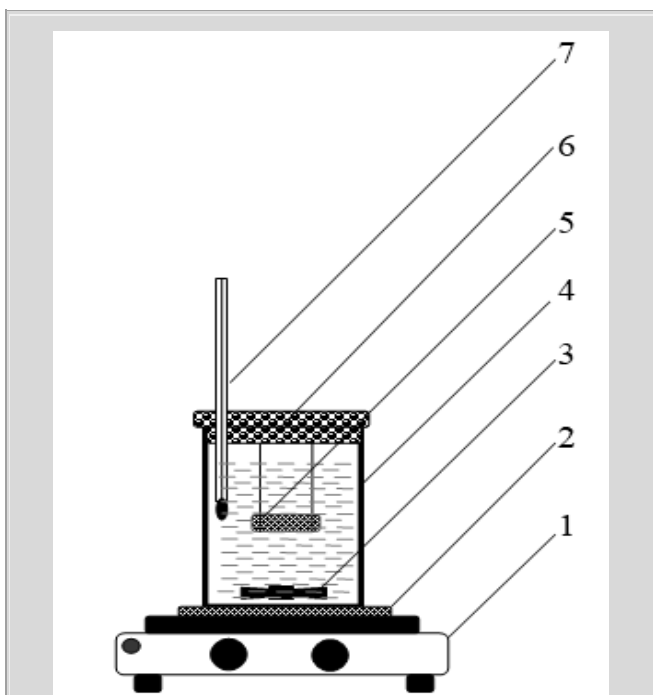


Рис. 3 Прилад для дослідження стійкості ХСКМ до дії нафтопродуктів в статичних умовах:
1 – електрична плита; 2 – азбестова прокладка; 3 – магнітний перемішувач; 4 – скляний стакан; 5 – досліджуваний зразок; 6 – кришка; 7 – термометр

Результати проведених досліджень в статичних умовах для зразків ХСКМ, які характеризують змінення $\sigma_{ст}$ та Δm зразка від тривалості дослідження (τ , міс.), наведені на рис. 4-7.

Представлені результати (див. рис. 4-5) свідчать про поступове зниження величини $\sigma_{ст}$ в залежності від середовища, в якому протягом 12 місяців перебував зразок ХСКМ – з 36 МПа до 28-35 МПа (для композиції А) та з 28 МПа до 18-27 МПа (для композиції Б).

При цьому, спостерігається збільшення величини Δm (див. рис. 6-7) внаслідок набухання зразків ХСКМ. Це збільшення складає на 0,01-0,14 (для композиції А) та на 0,03-0,21 (для композиції Б).

За впливом на величину $\sigma_{ст}$ зразка ХСКМ, агресивні середовища можна розташувати у наступному порядку:
ФСВ > КГ > НШ > ВО. (1)

Також слід зауважити, що на певному етапі дослідження спостерігається деяка стабілізація негативних змін ХСКМ за впливу агресивних середовищ. Це, наперед, пов'язано з заповненням пор та мікрокапілярів рідким середовищем, або хімічна і фізична взаємодія між ХСКМ і середовищем досягає рівноваги. Умовні фази змін та їх характеристика, що виникають при тривалому впливі агресивних середовищ на ХСКМ, представлено у табл. 1.

Окрім зміни показників, наведених вище, тривалий вплив (протягом 12 місяців) агресивних середовищ на зразок ХСКМ має і зовнішні (візуальні) ознаки, що представлені в табл. 2.

Результати дослідження зміни геометричних розмірів (співвідношення висоти до діаметру – Н/D) зразків ХСКМ в залежності від впливу таких хімічних реагентів, як 50 %-й водний розчин H_2SO_4 та 30 %-й водний розчин KOH, представлено в табл. 3.

Таблиця 1

Умовні фази змін та їх характеристика

Фаза змін	Тривалість, міс.	Характеристика
Індукційна	0÷1	Мінімальні зміни, повільне поглинання
Активна (гостра)	1÷ (6-10)	Швидке набухання, значні хімічні зміни
Плато / Насичення	(6-10) ÷ 12	Зміни сповільнюються, досягається рівновага
Пізня деградація	>12	Повільне старіння, мікротріщини, втома матеріалу

Таблиця 2

Зовнішні ознаки змін ХСКМ під впливом агресивних середовищ

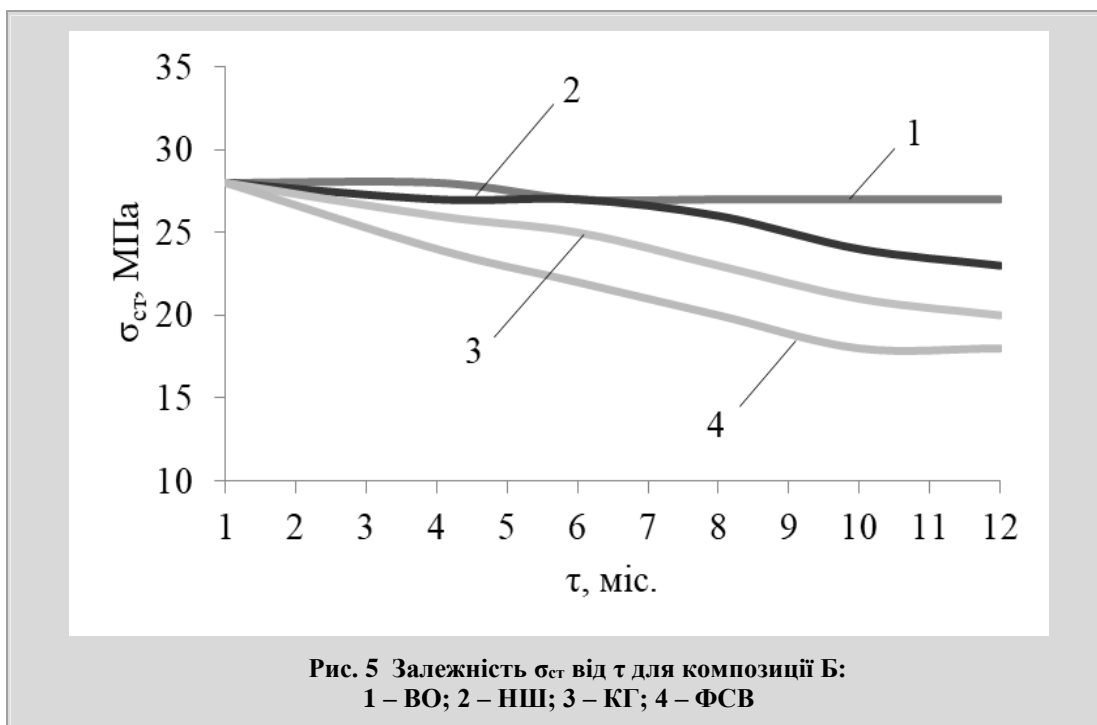
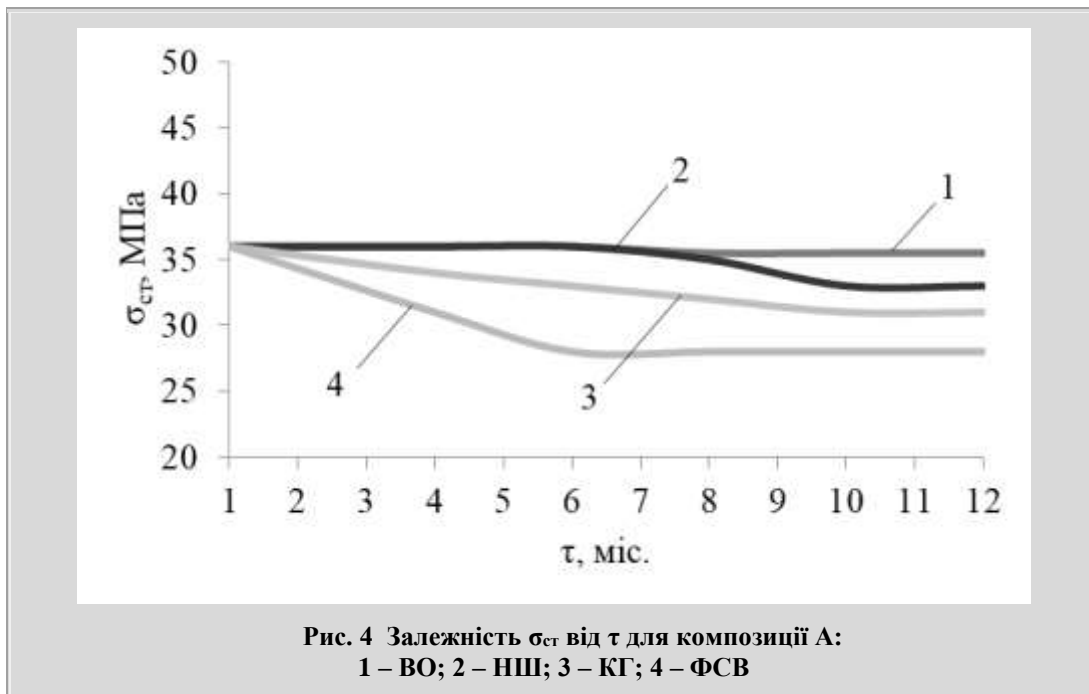
Найменування показника	Агресивне середовище			
	ВО	НШ	КГ	ФСВ
Візуальна оцінка зразка	Зміна кольору, поверхнева змазка	Потемніння, легка деформація граней	Пожовтіння, крайові розшарування	Розпушення поверхні, матовість, мікротріщини

Як показано у табл. 3, найбільше співвідношення Н/D зменшується у 30 % водний розчин KOH – на 12,8

% (композиція А) та 15,6 % (композиція Б), менше у 50 % водний розчин H_2SO_4 – на 7,6 % (композиція А) та

10,0 % (композиція Б). Зміни співвідношення Н/Д викликані набуханням, хімічним розшаруванням або розм'якшенням ХСКМ. Отже, співвідношення Н/Д

доцільно використовувати як індикатор рівня пошкодження матеріалу.



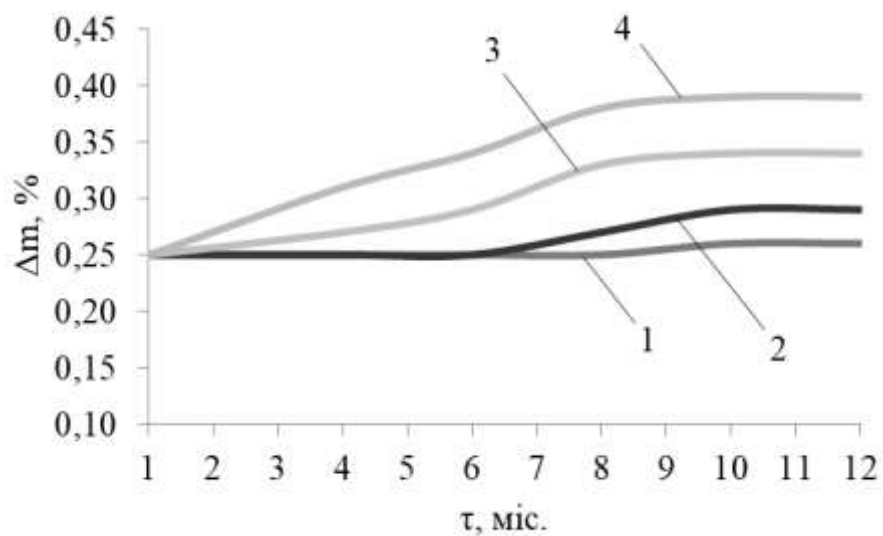


Рис. 6 Залежність Δm від τ для композиції А:
1 – ВО; 2 – НШ; 3 – КГ; 4 – ФСВ

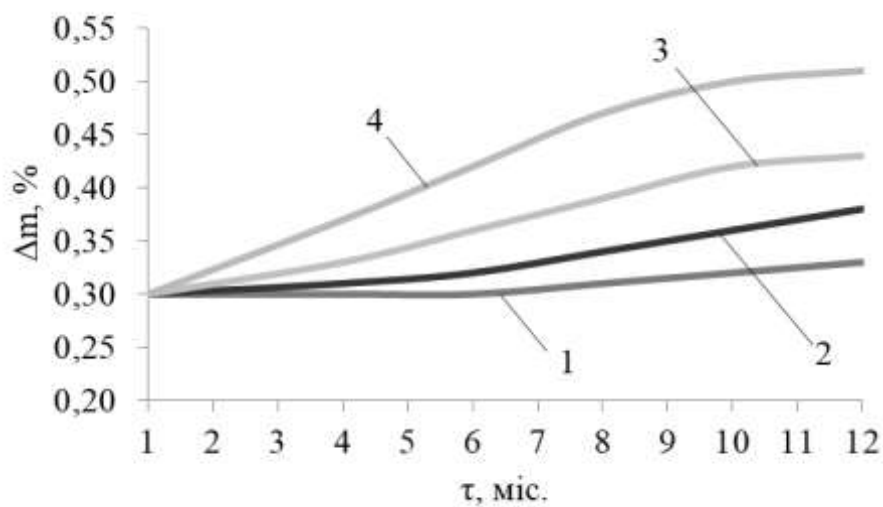


Рис. 7 Залежність Δm від τ для композиції Б:
1 – ВО; 2 – НШ; 3 – КГ; 4 – ФСВ

Таблиця 3

Зміна геометричних розмірів ХСКМ під впливом H_2SO_4 та KOH

Хімічний реагент	Значення Н/D для композицій			
	А		Б	
	Вихідне	Після обробки	Вихідне	Після обробки
50 %-й водний розчин H_2SO_4	0,250	0,231	0,250	0,225
30 %-й водний розчин KOH	0,250	0,218	0,250	0,211

Висновки

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити негативний вплив агресивних середовищ (відпрацьованої оливи, нафтового шламу, кислого гудрону та фенольних стічних вод) на ХСКМ, який проявляється у зниженні величини $\sigma_{ст}$ (в залежності від композиції та агресивного середовища з 36 (28) МПа до 28-35 (18-27) МПа) та в збільшенні величини Δm (в залежності від композиції та агресивного середовища на 0,01-0,14 або на 0,03-0,21).

При цьому, вплив агресивних середовищ можна поділити на умовні фази – індукційну (< 1 місяцю), активну (1 ÷ (6-10) місяців), насичення ((6-10) ÷ 12 місяців) та пізньої деградації (> 12 місяців). В цілому, аналіз отриманих результатів свідчить про високу стійкість запропонованих композицій ХСКМ до впливу відпрацьованих нафтопродуктів, нафтових залишків та фенольних стічних вод.

Запропоновані зразки ХСКМ проявляють високу стійкість до дії таких агресивних хімічних реагентів, як 50 %-й водний розчин H_2SO_4 (зміна Н/Д складала 7,6 % (композиція А) та 10,0 % (композиція Б)) та 30 %-й водний розчин KOH (зміна Н/Д складала 12,8 % (композиція А) та 15,6 % (композиція Б)). Подібна висока хімічна стійкість значно розширює спектр їх практичного застосування у промисловості.

Бібліографічний список

1. **Deepak Guru.** *Emergency Response & Disaster Management for Oil Refineries* / **Deepak Guru** // *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*. – 2018. – Vol. 4(6). – P. 266-270.
2. **Ravi K. Sharma.** *Automation of emergency response for petroleum oil storage terminals* / **Ravi K. Sharma, Ravi K. Sharma, Bhola R. Gurjar, Akshay V. Singhal, Satish R. Wate, Santosh P. Ghuge, Rajat Agrawal** // *Safety Science*. – 2015. Vol. 72. – P. 262-273. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.09.019>.
3. **Fayomi O.S.I.** (2019). *Economic Impact of Corrosion in Oil Sectors and Prevention: An Overview* / **O.S.I. Fayomi, I.G. Akande, S. Odigie** // *J. Phys.: Conf. Ser.* 1378: 022037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022037>.
4. **Білецький В.С.** *Основи нафтогазової інженерії: підручник для студентів вищих навчальних закладів* / **В.С. Білецький, В.М. Орловський, В.Г. Вітрик**. – Львів: Новий Світ - 2000, 2019. – 416 с.
5. **Kumbár V.** *Oil additive and its effect* / **V. Kumbár, P. Dostál** // *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. – 2013. Vol.

61(3). – P. 691-697. <https://doi.org/10.11118/actaun201361030691>.

6. **Muhammad Ali Ijaz Malik.** *Recent advancements, applications, and technical challenges in fuel additives-assisted engine operations* / **Muhammad Ali Ijaz Malik, M.A. Kalam, Muhammad Mujtaba Abbas, Arridina Susan Silitonga, Adeel Ikram** // *Energy Conversion and Management*. – 2024. – Vol. 313: 118643. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118643>.

7. **Курта С.А.** *Основи нафтохімії* / **Сергій Андрійович Курта**. – Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, 2020. – 193 с.

8. **Братичак М.М.** *Хімія нафти та газу* / **М.М. Братичак, В.М. Гунька**. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2020. – 448 с.

9. **Тертишна О.В.** *Технології виробництва олив. теорія та практика: підручник* / **О.В. Тертишна, О.О. Тертишний, П.І. Топільницький, К.М. Сухий**. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2023. – 275 с.

10. **Знак Ю.З.** *Вивчення складу та властивостей нафтошламів, утворених внаслідок переробки нафти* / **Ю.З. Знак, О.Б. Гринишин, Т.І. Червінський** // *Хімія, технологія речовин та їх застосування*. – 2023. – Т. 6. – № 1. – С. 69-74. <https://doi.org/10.23939/ctas2023.01.069>.

11. **Станкевич С.В.** *Управління та рекуперація відходів* / **С.В. Станкевич, Л.В. Головань, Є.М. Білецький [та інші.]**. – Харків: Видавництво Іванченка І.С., 2020. – 134 с.

12. **Фридер І.В.** *Використання кислих гудронів у виробництві нафтових бітумів* / **І.В. Фридер, П.І. Топільницький, О.Б. Гринишин** // *Вісник НУ "Львівська політехніка"*. – 2013. – № 761. – С. 452-456.

13. **Krymets G.V.** *Catalytic processing of the acid tars* / **G.V. Krymets, M.I. Litynska, O.V. Melnychuk** // *Catalysis and petrochemistry*. – 2022. – № 33. – С. 84-88. <https://doi.org/10.15407/kataliz2022.33.084>.

14. **Popovych V.V.** *Technogenic impact of acid tar storage ponds on the environment: a case study from Lviv, Ukraine* / **V.V. Popovych, M.S. Malovanyu, O.V. Prydatko, N.P. Popovych, M.V. Petlovanyi, K.A. Korol, A.S. Lyn, P.V. Bosak, O.G. Korolova** // *Ecologia Balkanica*. – 2021. – Vol. 13(1). – P. 35-44.

15. **Edenborn S.** *Influence of biochar application methods on the phytostabilization of a hydrophobic soil contaminated with lead and acid tar* / **S. Edenborn, H. Edenborn, R. Krynock, K.L. Haug** // *Journal of Environmental Management*. – 2015. – Vol. 150. – P. 226-2. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.023>.

16. **Siddiqui M.** (2-16). *Phenol degradation mechanism by electrooxidation using stainless steel elec-*

trodes / **M. Siddiqui, M. Al-Malack** / *Journal of Water Chemistry and Technology*. – 2016. – Vol. 38. – P. 28-33. <https://doi.org/10.3103/S1063455X16010057>.

17. **Vipulanandan C.** Cement and Concrete Research XRD analysis and leachability of solidified phenol-cement mixtures / **C. Vipulanandan, S. Krishnan** // *Cement and Concrete Research*. – 1993. – Vol. 23(4). – P. 792-802. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90033-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90033-6).

18. **Tuama W.K.** (2020). *Effect of Crude Oil Products on the Mechanical Characteristics of Reactive-Powder and Normal-Strength Concrete* / **W.K.Tuama, M.M. Kadhum, N.A. Alwash, Z.S. Al-Khafaji, M.S. Abdulraheem** // *Periodica Polytechnica Civil Engi-*

neering. – 2020. – Vol. 64(2). – P. 422–429. <https://doi.org/10.3311/PPci.15580>.

19. **Vikas Kataria.** *Impact of Petroleum Products on Strength of Concrete* / **Vikas Kataria, Ankur Tayala, Rishabh Kumar, Nikhil, Ravi Kumar, Abhishek Rai** // *International Journal of Engineering Research & Technology*. – 2019. – Vol. 8(05). – P. 523-526.

20. **Nada Mahdi Fawzi.** (2013). *Effect of Petroleum Products on Steel Fiber Reinforced Concrete* / **Nada Mahdi Fawzi, Sara Alaa Abed AL-Ameer** // *Journal of Engineering*. – 2013. – Vol. 19(1). – P. 13-34. <http://dx.doi.org/10.31026/j.eng.2013.01.02>.

Рукопис надійшов до редакції 10.07.2025 р.

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-3-27-36

Specialty 161. U.D.C. 621.763:621.893

STUDY OF THE EFFECT OF AGGRESSIVE ENVIRONMENTS AND CHEMICAL REAGENTS ON CHEMICAL-RESISTANT COMPOSITE MATERIALS

© **B.K. Artyshchenko¹, A.B. Grigorov²**

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine

¹ *Artyshchenko Bogdan Kostiantynovych, postgraduate student at the Department of Oil, Gas and Solid Fuel Processing Technologies (DOGSFP), e-mail: artyshchenkobogdan@gmail.com*

² *Grygorov Andriy Borysovych, Doctor of Technical Sciences, Prof., Prof. of DOGSFP, e-mail: grigorovandrey@ukr.net*

The article presents the results of a study of the negative impact of various aggressive environments (waste oil, oil sludge, acid tar and phenolic wastewater) and chemical reagents (50 % aqueous solution of H₂SO₄ and 30 % aqueous solution of KOH) on a polymer-containing chemically resistant composite material (CRCM) obtained from waste and secondary products of the oil refining and coke chemical industries of Ukraine. The destructive effect on structural materials of additives, resinous-asphalt substances, alkalis, organic and mineral acids, phenols contained in the production and purification waste of commodity and waste oil products, industrial wastewater is analyzed. A structural scheme for obtaining CRCM for further laboratory research is proposed. Implementing this scheme, two compositions were obtained: A (50 % (PET, HDPE) + 30 % (sand) + 10 % (coke dust) + 5 % (used SAE 15W-40 oil) + 5 % (kaolin)) and B (50 % (PET, HDPE) + 25 % (sand) + 15 % (ash) + 5 % (used SAE 15W-40 oil) + 5 % (kaolin)). It was on these compositions, under static research conditions (duration 12 months, ambient temperature 25 °C), that the negative impact of aggressive environments on CRCM was determined.

It has been established that this effect manifests itself in a decrease in compressive strength (depending on the composition and aggressive environment from 36(28) MPa to 28-35 (18-27) MPa) and an increase in the mass of the sample Δm (depending on the composition and aggressive environment by 0.01-0.14 or by 0.03-0.21). It has been determined that the proposed CRCM samples exhibit high resistance to aggressive chemical reagents such as a 50 % aqueous solution of H₂SO₄ (the change in the ratio of the sample height to diameter (H/D) was 7.6 % for composition A) and 10.0 % for composition B) and 30 % aqueous solution of KOH (the change in H/D was 12.8 % for composition A and 15.6 % for composition B). Such high resistance of CRCM to aggressive environments and chemical reagents makes them a very promising material for use in oil refineries and coke chemical plants in-



stead of reinforced concrete structures in biological wastewater treatment and drainage systems, at production sites, and in production waste storage areas.

Keywords: oil refining and coking industry, composite material, chemical resistance, processing, polymers, oil sludge, acid tar, coke dust, ash, phenolic wastewater.

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

Manuscript received 2025/07/10



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 № 3 від 29. 09. 2025 р.

Відповідальний за випуск Чешко Ф.Ф.

Набір тексту та макет Званчук-Малік В.Г.

Ціна договірна

Підписано до друку 06.10.2025 р. Формат 60×84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Друк офсетний.

Облік.-видавн. арк. 4,19. Умовн. друк. арк. 4,18. Наклад 150 прим. Зам. № 25-23.

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