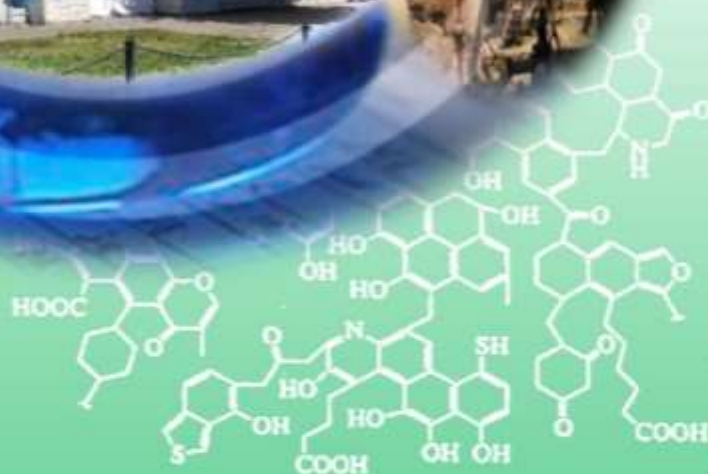
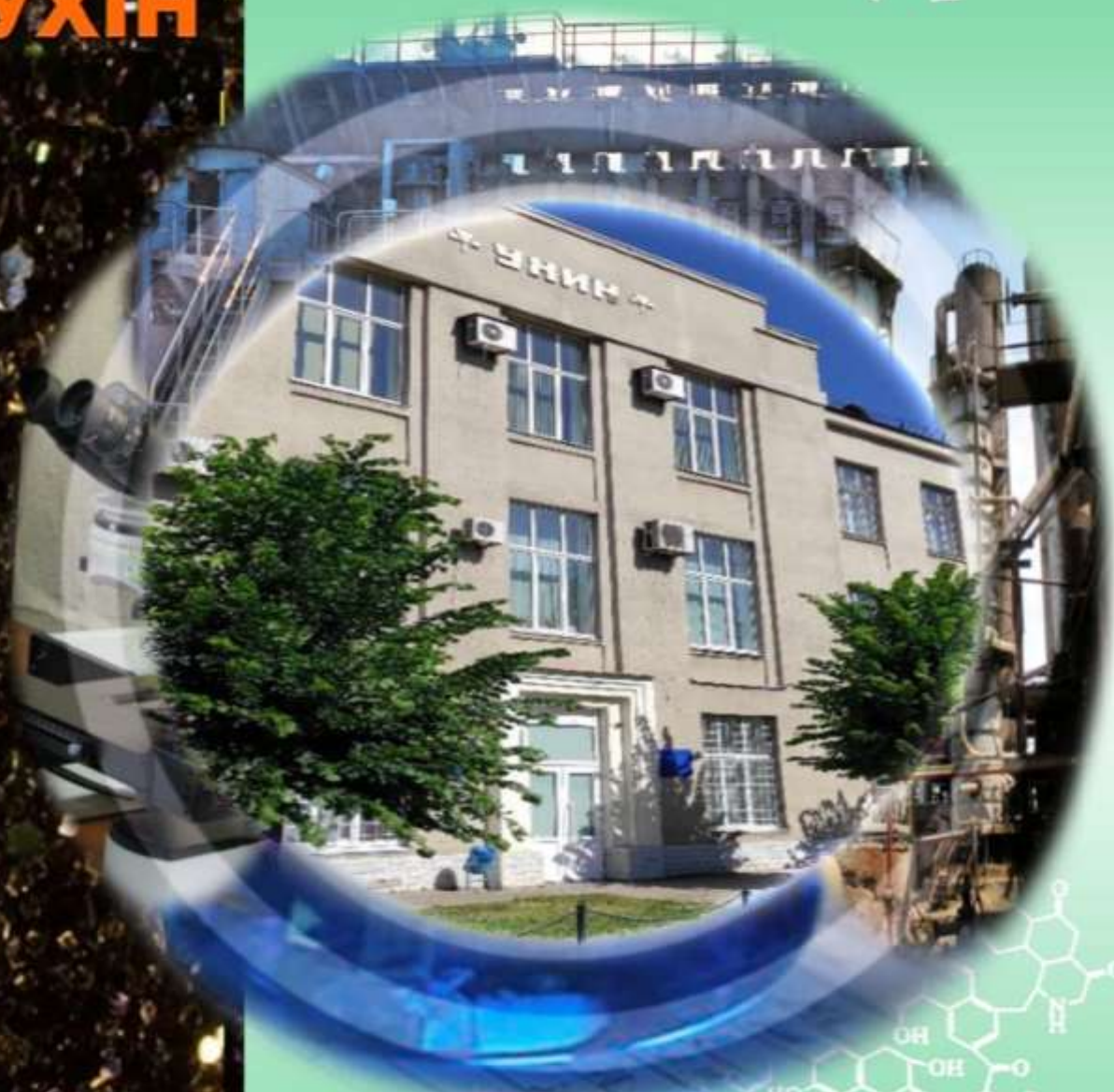




ISSN 1681-309X

ВуглеХімічний журнал



4 2025

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



Наказом МОН України від 02.07.2020 № 886

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

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

Вуглехімічний журнал індексується в міжнародній наукометричній базі

Index Copernicus

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР – с.н.с., к.т.н. О.Л. Борисенко (м. Харків).

Технічні науки (102; 161)

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

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

4

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.

- Хаустова В.Є., Кизим М.О., Котляров Є.І., Шульга І.В.* Напрямки роз-
витку коксової та безкоксової металургії 3
- Борисенко О.Л., Шульга І.В., Телешев Ю.В., Котляров Є.І.* Використан-
ня вторинних сірковмісних продуктів у складі вугільних шихт для
коксування 13
- Присяжний Ю.В., Донченко М.І., Чіпко Т.А., Григораши М.В., Пиш'єв
С.В.* Використання продуктів переробки бурого вугілля як модифіка-
торів дорожніх бітумів 20
- Борисенко М.О., Сінкевич І.В.* Використання відходів коксохімічних
підприємств у виробництві шліфувально-полірувальних паст 27

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-4-1-36

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



Journal of Coal Chemistry

4

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
agreement.

- Khaustova V.Ye., Kyzym M.O., Kotlyarov Ye.I., Shulga I.V.*** Directions for the development of coke and non-coke metallurgy 3
- Borysenko O.L., Shulga I.V., Teleshev Yu.V., Kotlyarov Ye.I.*** Use of secondary sulphur-containing products in coal mixtures for coking 13
- Prysyazhny Yu.V., Donchenko M.I., Chipko T.A., Hryhorash M.V., Pyshyev S.V.*** Use of brown coal processing products as modifiers for road bitumens 20
- Borysenko M.O., Sinkevich I.V.*** Use of coke chemical enterprise waste in the production of grinding and polishing pastes 27

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-4-1-36

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

НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ КОКСОВОЇ ТА БЕЗКОКСОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ*© В.Є. Хаустова¹, М.О. Кизим², Є.І. Котляров³*Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України (НДЦ ІПР), 1а, 2 пов., пров. Інженерний, Харків, Україна, 611661***І.В. Шульга⁴***Державне підприємство «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут» (ДП «УХІН»), 7, вул. Весніна, Харків, Україна, 61023*¹ Хаустова Вікторія Євгенівна, докт. економ. наук, проф., директор, e-mail: v.khaust@gmail.com² Кизим Микола Олександрович, докт. економ. наук, проф., член-кореспондент НАН України, головний наук. співр., e-mail: m.kyzum@gmail.com³ Котляров Євген Іванович, канд. економ. наук, доц., зав. сектору економічної безпеки та енергозбереження, e-mail: ekotlarov@i.ua⁴ Шульга Ігор Володимирович, канд. техн. наук, доц., с.н.с., зав. коксового відділу, e-mail: ko@ukhin.org.ua

Обґрунтовані науково-практичні пропозиції щодо повоєнного відновлення металургійної промисловості України на основі «зелених» технологій: прямого відновлення заліза та отримання сплавів із заданими властивостями в електropечках. Як відновник запропоновано використовувати генераторний газ із вугілля, збагачений воднем. Як джерело енергії для електричних печей та збагачення генераторного газу електролізним воднем – електроенергію від утилізації ентальпії отриманого генераторного газу. Коксове виробництво збереже своє значення для отримання феросплавного коксу та, можливо, доменного коксу для виплавки ливарного чавуну. При цьому перспективним є отримання коксу в печах без уловлювання хімічних продуктів, яке, на відміну від коксування в регенераторних печах під надлишковим тиском, здійснюється в пічних камерах під розрідженням, що дозволяє значно скоротити викиди забруднювальних речовин у довкілля. Використання водню для відновлення металів із руд дозволить також значно зменшити викиди парникового вуглекислого газу. Для хіміко-технологічної переробки найприйнятнішим є малометаморфване вугілля (буре, довгополум'яне та газове). Зруйнованість більшості вугільної електрогенерації спричинила надлишок такого вугілля, яке видобувається в Україні. Тому розвиток металургії, заснованої на використанні малометаморфованого вугілля, дасть можливість не лише забезпечити країну високоякісною металопродукцією, а й зберегти вуглевидобувну промисловість і, більше того, створити нові можливості для її розвитку, забезпечивши стійкий збут продукції та прибуткову операційну діяльність.

Ключові слова: «зелена» металургія, пряме відновлення заліза, малометаморфване вугілля, газифікація вугілля, коксування, коксові печі, уловлювання хімічних продуктів, двохпродуктове коксування.

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

Метою дослідження є науково-технічне обґрунтування технологічних основ повоєнного відновлення та подальшого розвитку металургійної галузі України.

Завданням, яке вирішується на даному етапі, є техніко-економічний аналіз перспектив використання термохімічної переробки вугілля для створення «зелених» металургійних процесів.

Залізо є четвертим за розповсюдженням по масі хімічним елементом в літосфері нашої планети (після алюмінію, кремнію, кисню). Значення цього елемента в створенні та розвитку сучасної цивілізації важко переоцінити. Достатньо сказати, що на даний час світове виробництво сталі перевищує 1,8 млрд т/рік [1].

* НТЕР виконувалась за рахунок бюджетних коштів, спрямованих на забезпечення проведення державними науковими установами наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок за результатами державної атестації

У чистому вигляді металічне залізо не має промислового значення. Але, додавання до його складу принаймні декількох відсотків інших хімічних елементів дозволяє отримати сплави, які мають потрібні людству властивості. Найбільш відомими з них є чавун (містить 2,14-6,67 % вуглецю) та різні види сталі – сплави з меншою кількістю вуглецю (вуглецеві сталі) і, можливо, такими елементами як кремній, марганець, хром, нікель, молібден, вольфрам тощо. Останнє дозволяє отримувати леговані сталі з унікальними властивостями.

На даний час у світі промислове значення мають три основних способи отримання сталі на основі заліза, проаналізовані нами в [2] і наведені на рис. 1.

Переробка металобрухту в електродугових печах є найбільш екологічно чистим способом отримання сталі (за умови, що необхідна електроенергія є «зеленою», тобто її виробництво не пов'язане з викидами парникових газів). В Україні частка металобрухту у загальному обсягу виробництва сталі в останні роки коливається в межах 16-23 % (рис. 2) – [3].



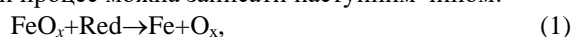
В той же час в світі частка металобрухту в загальному обсязі виплавки сталі сягає 30 %. В подальшому очікується зростання цієї частки до 45 % [3]. В середньостроковій перспективі в сфері використання металобрухту очікуються [3]:

– глобальний попит на металобрухт зросте з 650 млн т в 2023 р. до 964 млн т в 2050 р.;

– згідно зі сценаріями Mission Possible Partnership, IEA та E3G, очікується, що ця частка зросте приблизно з сьогоднішніх 30% до 45% у 2050 р.;

– за прогнозом OECD використання брухту в електродугових печах може зрости більш ніж удвічі — з 360 млн т у 2019 р. до 820 млн т у 2050 р.

Але, цей спосіб може розглядатися лише як доповнюючий до інших двох (доменного виробництва та прямого відновлення заліза), оскільки він в принципі не може задовольнити зростаючі в часі потреби в металопродукції. Тобто, основними напрямками задоволення потреб в сталевій продукції є коксова та безкоксва металургія. Загальним для цих двох способів є те, що, оскільки в природі залізо зустрічається не у чистому вигляді, а у вигляді оксидів (сполук заліза з киснем), то отримання чистого заліза з оксидів можливо шляхом взаємодії цих оксидів з відновниками (іншими елементами, або їх сполуками). В найзагальнішому вигляді цей процес можна записати наступним чином:



де FeO_x – оксиди заліза в руді (суміш оксидів FeO та Fe_2O_3 умовно подана як сполука змінного складу); Red – відновник; O_x – окиснена форма відновника.



Рис. 2 Динаміка виплавки сталі і заготівлі металобрухту в Україні за 2021-2024 р.р.

В залежності від типу застосованого відновника, власне, і розрізняють коксову і безкоксову металургію, див. табл. 1.

Коксова металургія базується на відновленні заліза в доменних печах за допомогою коксу, вміст вуглецю в органічній масі якого сягає 98 %. За безкоксової мета-

лургії використовують інші відновники. При цьому, в залежності від типу застосовуваного відновника (який одночасно має бути і джерелом тепла для здійснення ендотермічних реакцій відновлення), суттєво змінюються викиди в довкілля парникового вуглекислого газу.

Таблиця 1

Порівняння коксової та безкоксової металургії

	Відновник	Хімічна сутність
Коксова металургія	Вуглець у вигляді коксу (вміст вуглецю в органічній масі коксу $\approx 98\%$)	Оксиди заліза + вуглець \rightarrow залізо + оксиди вуглецю: $FeO_x + C \rightarrow Fe + xCO$
Безкоксова металургія	Водень	Оксиди заліза + водень \rightarrow залізо + вода: $FeO_x + xH_2 \rightarrow Fe + xH_2O$
	Суміш водню і монооксиду вуглецю (синтез-газ)	Оксиди заліза + синтез-газ \rightarrow залізо + вода + діоксид вуглецю: $FeO_x + xH_2 \rightarrow Fe + xH_2O$; $FeO_x + xCO \rightarrow Fe + xCO_2$.

Нами проаналізована кількість утворюваного парникового вуглекислого газу в залежності від типу використуваного відновника для випадку відновлення магнетиту Fe_3O_4 ($FeO \cdot Fe_2O_3$). При цьому витрату відновника безпосередньо на відновлення заліза приймали за результатами стехіометричних розрахунків з використанням закону еквівалентів, а витрату відновника як палива для досягнення необхідної температури реакції відновлення – з урахуванням залежності теплоємності магнетиту від температури:

$$C_p = A + BT + \frac{C}{T^2}, \quad (2)$$

де C_p – питома мольна теплоємність за сталого тиску в інтервалі температур від $25\text{ }^\circ\text{C}$ до $(T-273)\text{ }^\circ\text{C}$; T – абсолютна температура, К; A , B , C – числові коефіцієнти згідно із довідковими даними [4].

Отримані результати наведені в табл. 2. З них видно, що кількість утворюваного парникового вуглекислого

газу суттєво залежить від типу використуваного відновника.

Розглядаючи перспективи розвитку коксової та безкоксової металургії в Україні, необхідно звернути увагу на два наступні чинники:

- можливості отримання доменного коксу в необхідній кількості та з потрібною якістю;
- зобов'язання України щодо досягнення кліматичної нейтральності промисловості.

Можливості отримання необхідної кількості коксу.

Виробництво доменного коксу – окрема, важлива ще з радянських часів підгалузь господарства. Крім доменного коксу, підгалузь виробляла велику кількість різноманітних хімічних продуктів. На рис. 3 наведено продуктову характеристику коксохімічної промисловості України на час отримання незалежності. Рисунок складено на підстав даних [5].

Протягом 1991-2016 рр. обсяги виробництва коксу та хімічних продуктів практично невинно знижувалися [5-8], що пояснюється низкою об'єктивних та суб'єктивних чинників. Після 1990 р. були зупинені Стаханівський та Донецький КХЗ, виробництво коксу

на 2-й дільниці Макіївського КХЗ, виведені з експлуатації або поставлені на консервацію низка коксових батарей. На кінець 2016 р. річна виробнича Ряд підприємств опинились на непідконтрольній території, зокрема Макіївський та Ясинівських КХЗ, Алчевське КХВ.

Таблиця 2

Утворення парникового діоксиду вуглецю за використання різних відновників (на прикладі відновлення магнетиту Fe₃O₄)

Хімічна реакція	Стехіометричне утворення CO ₂ за реакцією, т/т заліза	Витрати відновника у якості палива для досягнення температур реакції, т/т заліза	Утворення CO ₂ при спалюванні відновника, т/т заліза	Сумарні викиди CO ₂ , т/т заліза
Відновлення вуглецем				
$Fe_3O_4 + 2C \rightarrow 3Fe + 2CO_2$	0,524	0,100	0,297	0,821
Відновлення воднем				
$Fe_3O_4 + 4H_2 \rightarrow 3Fe + 4H_2O$	-	0,033	-	-
Відновлення синтез-газом (співвідношення H ₂ :CO=1:1)				
$Fe_3O_4 + 2H_2 + 2CO \rightarrow 3Fe + 2H_2O + 2CO_2$	0,524	0,450	1,539	2,063
Відновлення синтез-газом (співвідношення H ₂ :CO=4:1)				
$5Fe_3O_4 + 16H_2 + 4CO \rightarrow 15Fe + 16H_2O + 4CO_2$	0,210	0,120	0,342	0,552

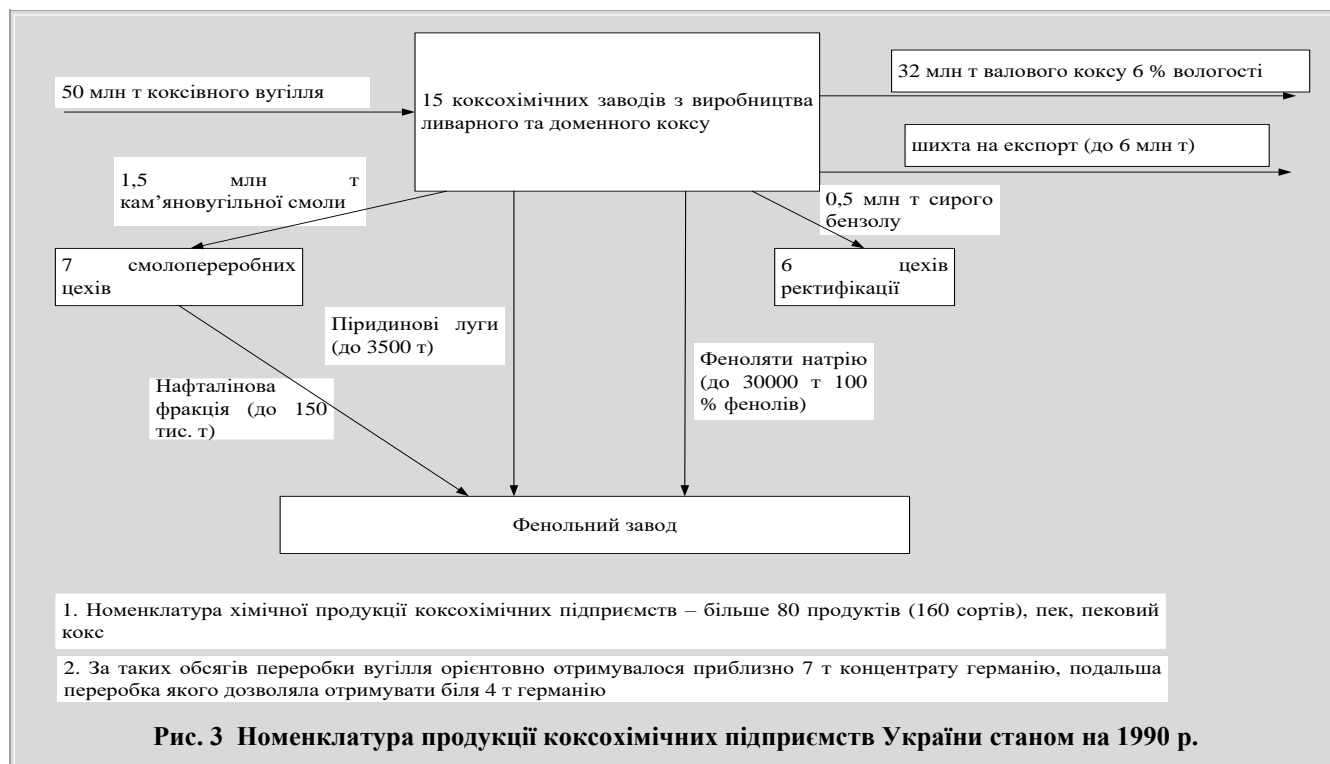


Рис. 3 Номенклатура продукції коксохімічних підприємств України станом на 1990 р.

Після початку повномасштабного вторгнення російських загарбників були зруйновані потужності на ПрАТ «Азовсталь» та ПрАТ «Авдіївський КХЗ». З інших причин було зупинено виробництво коксу на ПрАТ «ДМЗ» [10] та Харківському коксовому заводі.

Але, навіть ті потужності, які залишилися в робочому стані на контрольованій території, зменшуються

протягом часу внаслідок погіршення фізичного стану пічного фонду. Єдиним позитивним прикладом в цьому плані є пуск двох нових батарей на ПАТ «АрселорМітал Кривий Ріг» [11]. В табл. 3 наведено оцінку виробничої потужності коксохімічних виробництв, які працюють в даний час на підконтрольній території України.

Таблиця 3

Оцінка виробничої потужності коксохімічного виробництва станом на липень 2025 р.

Виробнича потужність та чинники, що впливають на її зміну	Числове значення, тис т
Виробнича потужність на 01.01.2017	16914,9
Зменшення виробничої потужності внаслідок втрати в 2017 р. контролю над частиною активів в Луганській та Донецькій областях	-5967,5
Зменшення виробничої потужності внаслідок руйнації підприємств за повномасштабної агресії	-5121,4
Введення в експлуатацію коксових батарей	+2000,0
Зупинка потужностей за порушення екологічного законодавства	-148,2
Зупинка потужностей за рішенням власника	-2243,8
Зниження виробничої потужності внаслідок зменшення кількості працюючих печей	-216,1
Зниження виробничої потужності внаслідок збільшення терміну експлуатації та погіршення технічного стану печей	-600,3
Виробнича потужність станом на 01.07.2025	4618,5

З одного боку, така виробнича потужність може забезпечити виплавку чавуну на рівні 10,2 млн т/рік за умови заміни частини коксу пиловугільним паливом (при виробничих потужностях доменного виробництва 21,4 млн т чавуну на рік та витраті коксу 450 кг/т чавуну).

Але для цього потрібно $\approx 12,8$ млн т на рік коксівного вугілля за витратного коефіцієнту сухої шихти на отримання сухого валового коксу 1,33. Внаслідок бойових дій, Україна в січні 2025 р. повністю припинила видобуток якісного коксівного вугілля на підприємстві «Шахтоуправління «Покровське», на частку якого в

останні роки припадало $\approx 2/3$ видобутку українського коксівного вугілля. Тобто, в найближчі роки потреби в сировині коксохімічні підприємства зможуть задовольнятися переважно за рахунок імпорту і, частково, – за рахунок вугілля Західного Донбасу (ПрАТ «Павлоградвугілля»).

Потенційні напрямки імпорту коксівного вугілля можуть бути визначені на підставі даних Укрстату [12] щодо обсягів зовнішньої торгівлі

України протягом 2022-2024 р., коли відбулася переорієнтація імпорту – табл. 4.

Таблиця 4

Обсяги імпорту коксівного вугілля в Україну в 2022-2024 р.р.

Країна	Постачання по роках, тис т				Середня ціна, \$/т
	2022	2023	2024	разом	
Австралія	198,5	149,3	197,1	544,9	396,9
Казахстан	94,4	1,1	5,5	101,0	314,8
Киргизстан	9,9	-	-	9,9	92,7
Канада	78,4	-	-	78,4	272,3
Колумбія	215,9	2,2	66,0	284,1	176,7
Південна Африка	-	-	0,3	0,3	138,4
Польща	137,9	100,7	211,5	450,1	187,8
США	643,5	181,5	365,7	1190,7	367,1
Чехія	34,7	3,4	276,8	314,9	269,1
Разом	1413,2	438,2	1122,9	2974,4	313,1

Єдиним вірогідним постачальником коксівного вугілля в майбутньому може стати лише вугільна компанія United Coal Company, США (дочірня компанія ТОВ «МЕТІНЕВЕСТХОЛДІНГ») – виробничі потужності ≈ 3 млн т коксівного вугілля на рік [13]. Певні очікування можуть бути пов'язані також з вугільними компаніями Польщі (обсяг експорту коксівного вугілля в 2023 р. у сусідні країни ЄС склав 3,1 млн т), Колумбії та Чехії. Обмеження щодо імпорту вугілля з інших континентів висуває пропускна спроможність морських портів України, яка оцінюється на рівні до 3 млн т на рік. В майбутньому обсяг виробництва коксу буде визначатися, окрім стану виробничих потужностей і можливостей імпорту вугілля, ще й потребою металургійних підприємств в доменному та інших видах коксу, яка може задовольнятися і за рахунок імпортованих поставок.

Викладене призводить до наступних висновків щодо подальшого функціонування коксохімічної промисловості:

1. Використання коксу в металургійній промисловості буде необхідним і в майбутньому, але з урахуванням необхідності розвитку «зеленої» металургії [14] в значно менших кількостях – лише для виробництва феросплавів і, можливо, для отримання ливарного чавуну.

2. Прийнята за радянських часів концепція розвитку коксохімічної промисловості, спрямована на максимізацію обсягів переробки вугілля і виробництва коксу та організацію на цій основі централізованих цехів з переробки хімічних продуктів, на даний час себе практично вичерпала.

3. Значний знос пічного фонду обмежує можливості виробництва коксу навіть в значно менших обсягах. За таких умов необхідним є новий підхід до технології виробництва коксу. При цьому слід враховувати необхідність відновлення потужностей з виробництва коксу, а на звільнених територіях – фактично їх нового будівництва.

Це дає можливість сформулювати наступні висновки та пропозиції:

1. Перспективна потреба в коксі валовому 6 %-вої вологості може бути оцінена на рівні до 2 млн т на рік.

2. На даний час функціонують 2 цехи з переробки кам'яновугільної смоли та 2 з переробки сирого бензолу. Застарілість основних засобів (вони були відновлені наприкінці 40-х років ХХ сторіччя) та низький рівень завантаженості потужностей роблять ці виробництва нерентабельними, а їх продукцію неконкурентоспроможною.

3. Як новий для нашої країни підхід до технології отримання коксу може, на нашу думку, бути запропонована т.зв. «двохпродуктова» технологія в печах без вловлювання хімічних продуктів з отриманням коксу і електроенергії.

Блок-схему двопродуктової батареї, на якій виробляються кокс і електроенергія, наведено на рис. 4 (складено за матеріалами [15]). Схема побудована для коксової батареї з 32 камер коксування з корисним об'ємом кожної 45,7 м³. Перевагами такої технології є:

1. Менші питомі капіталовкладення – батареї печей без уловлювання значно простіші за своєю конструкцією в порівнянні з традиційними регенеративними печами (кількість типорозмірів вогнетривів більш ніж втричі менша), відсутність хімічних цехів вловлювання і переробки хімічних продуктів коксування.

2. Більша екологічність процесу: оскільки печі працюють під розрідженням, практично відсутні викиди в атмосферу шкідливих речовин. Викиди парникового газу менші, ніж за газифікації вугілля.

3. Можливість отримання електроенергії (у тому числі товарної) за рахунок використання скидного енергетичного потенціалу продуктів спалювання, що залишають опалювальну систему печей з температурою ≈ 1100 °С. Середній склад продуктів спалювання (об. %): CO₂ – 5,6; H₂O – 16,5; O₂ – 8,0; N₂ – 69,9. Загальна кількість отримуваної електроенергії оцінюється нами на рівні ≈ 830 кВт·годин/т валового коксу.

Інший чинник, що впливатиме на перспективи подальшого розвитку коксової металургії, – міжнародні зобов'язання України щодо зниження викидів парникових газів, а це є поштовхом до розвитку саме безкоксвої металургії.

Як виробництво, так і подальше використання коксу в металургійній промисловості призводить до утворення великої кількості діоксиду вуглецю – парникового газу. За оцінками Міжнародної енергетичної агенції, в 2020 р. світова металургія 74 % усіх енерговитрат задовольняла за рахунок вугілля (яке є основним промисловим джерелом вуглецю), внаслідок чого вона продукувала 7 % загальних світових щорічних викидів діоксиду вуглецю [16]. Середньосвітові викиди цього парникового газу складають 1,4 т/т чавуну [16].

За нашими розрахунками викиди діоксиду вуглецю в окремих підгалузях українського ГМК, які використовують кокс, є вищими за середньосвітовий рівень – табл. 5. Як свідчать наведені дані, основним джерелом викидів парникового газу в металургії є саме виробництво чавуну – 97,3-98,1 % від загальних питомих викидів. Саме це зумовлює необхідність заміни вуглецю іншим відновником – воднем або синтез-газом (сумішшю водню та монооксиду вуглецю).

Раніше нами були досліджені варіанти отримання водню для використання в технології синтетичного рідкого палива [17; 18] та як відновника для потреб отримання заліза [14] – табл. 6.

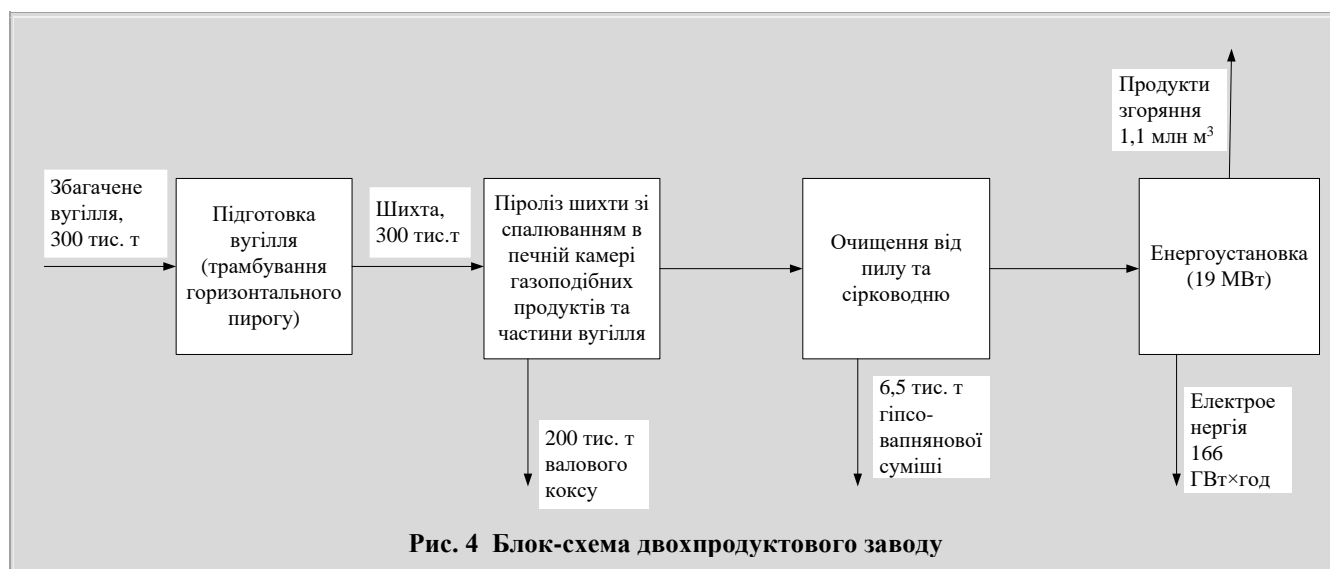


Рис. 4 Блок-схема двохпродуктового заводу

Таблиця 5

Джерела утворення діоксиду вуглецю в основних металургійних процесах

Процес	Сутність процесу	Викиди CO ₂ , кг/т чавуну
Виробництво коксу	Нагрів вугілля до температури 1000-1100 °С без доступу повітря (піроліз); необхідна температура досягається шляхом спалювання частини отриманого супутнього продукту – коксового газу	92-136
Виробництво агломерату	Процес застосовується для огрудкування дрібних фракцій залізнорудного концентрату за високих температур, які досягаються шляхом спалювання коксового дрібняку	183,1-327
Виробництво феросплавів	Процес застосовується для виробництва сплавів заліза з легуючими елементами (кремній, марганець, хром тощо); процес отримання феросплавів протікає за високих температур, які досягаються за рахунок електричного нагріву. Коксовий горіх, що використовується як відновник, утворює оксид вуглецю CO, який за подальшого спалювання перетворюється на парниковий діоксид вуглецю	1171-2240
Виробництво чавуну	Нагрів шихти (суміші доменного коксу, залізновмісної сировини, флюсів) до температури протікання реакцій відновлення заліза; необхідна температура досягається шляхом спалювання частини доменного коксу	1947-2200
Разом в розрахунку на 1 т чавуну		1984-2261

Найбільшого поширення в світі набула парова каталітична конверсія метану природного газу. Перевагою отриманого таким чином продукту є високий вміст водню – 75-80 % (об.), тобто основна частка заліза відновлюватиметься саме воднем, без додаткового утворення діоксиду вуглецю. Напряму наразі непридатний для українських реалій внаслідок недостатнього видобутку вітчизняного природного газу і високих цін на цей вид імпортного палива.

Отримання водню з коксового газу є привабливим, коли коксохімічні підприємства працюють на рівні, близькому до 100 % використання виробничої потужності. За таких умов ≈ 40 % коксового газу, що утворюється при коксуванні вугілля, є надлишковим та може

бути спрямованим на отримання водню. Але сучасний стан коксохімії [19], який характеризується спадом обсягів виробництва як коксу, так і коксового газу, робить цей спосіб нереальним.

Отримання водню шляхом електролізу води є екологічно чистим процесом, але тільки за умови, що необхідна електроенергія також є екологічно чистою (отримується шляхом використання відновлюваних джерел енергії без утворення парникових газів). За нашими розрахунками на отримання 1 м³ водню необхідно 630 кВт×год електроенергії [18]. Для відновлення 1 т заліза з магнетиту (Fe₃O₄), необхідно 357 м³ водню, для одержання якого, в свою чергу, потрібно 225 МВт×год електроенергії.

Таблиця 6

Основні промислові способи отримання водню

Спосіб	Сутність	Переваги та недоліки
Парова каталітична конверсія метану природного газу	Нагрів метану з водяною парою та збагачення суміші повітрям і киснем; подача до конвертору, в якому відбувається процес отримання водню: $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	Перевага: отримуваний синтез-газ містить ≥ 75 (об.) % водню, що робить спосіб привабливим для прямого відновлення заліза. Недолік: ресурси недорогого природного газу в Україні відсутні.
Виділення водню з коксового газу	Розділення коксового газу шляхом короткоциклової адсорбції або послідовного зрідження всіх компонентів газової суміші, окрім водню	Перевага: сировина – недорогий коксовий газ, що містить ≈ 60 % (об.) водню. Недолік: відсутність вільних ресурсів коксового газу через недовантаженість виробничих потужностей коксохімічних підприємств
Газифікація вугілля	Взаємодія вуглецю вугілля з водяною парою або водою та киснем: $\lambda\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2(\lambda - 1)\text{CO} + (2 - \lambda)\text{CO}_2$; $\gamma\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (2\gamma - 1)\text{CO} + (1 - \gamma)\text{CO}_2 + \text{H}_2$; λ, γ - числові коефіцієнти, що характеризують співвідношення кількостей продуктів реакції та залежать від умов здійснення процесу: $1 \leq \lambda \leq 2; 0,5 \leq \gamma \leq 1$	Перевага: сировиною є малометаморфоване вугілля, яке видобувається в Україні та складає $\approx 2/3$ наявних геологічних запасів. Недолік: в кінцевому підсумку практично весь вуглець вугілля перетворюється на оксиди вуглецю та в подальшому скидається в атмосферу у вигляді парникового вуглекислого газу
Електроліз води	Розклад води під дією електричного струму: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	Перевага: екологічно чисте виробництво Недолік: велика витрата електроенергії

Отже, при оцінці, як воднева металургія впливає на досягнення кліматичних цілей людства, важливим є походження електроенергії. Кліматично нейтральною така технологія отримання заліза буде лише за умови використання кліматично нейтральної електроенергії. Саме за таких умов процес має промислове значення. Наприклад, зараз у Північній Швеції (м. Боден) реалізується масштабний проект з виробництва «зеленої» сталі, який передбачає будівництво електролізерів потужністю 740 МВт [20]. Необхідну електроенергію планується отримувати з відновлюваних джерел. В подальшому отриманий водень дозволить отримувати близько 5 млн т «зеленої» сталі на рік при одночасному скороченні викидів CO_2 на 95 %.

Для умов України більш привабливим напрямком розвитку безкоксової металургії є відновлення заліза синтез-газом, який отримується шляхом газифікації вугілля. На користь такого шляху розвитку свідчить наявність діючих потужностей з видобутку вугілля, яке придатне для газифікації та наразі має обмежений збут внаслідок руйнації вугільної електрогенерації. Недоліком відомих процесів газифікації вугілля є висока концентрація монооксиду і діоксиду вуглецю в отримуваному синтез-газі. Це не дозволяє досягнути суттєвого зниження викидів діоксиду вуглецю при відновленні заліза таким синтез-газом.

Перспективним є поєднання процесу газифікації вугілля з електролізом води, як це запропоновано нами за виконання проєкту НФДУ з виробництва синтетичного моторного палива [21]. Сутність пропозиції полягає у використанні для газифікації вугілля процесу Техасо (прямоточна киснева газифікація в потоці водовугільної пульпи), за яким супутнє виробництво водяної пари в потрібній кількості та з необхідними параметрами дозволяє отримувати електроенергію в обсягах, які суттєво перевищують потреби підприємства. Цю електроенергію можна спрямовувати на електроліз води і отримання додаткових ресурсів водню [18].

Базуючись на раніше виконаних розрахунках, можна оцінити техніко-економічні показники процесу прямого відновлення заліза синтез-газом, який збагачений воднем – табл. 7. Надлишок електроенергії може бути спрямований або на додаткове виробництво водню, або на виплавку сталі в електродугових печах. Конкретний напрямок має бути визначений шляхом вирішення оптимізаційної задачі – куди спрямовувати надлишкову електроенергію газифікації: на виробництво додаткового водню (зменшення викидів парникового газу), чи на виплавку заліза (підвищення енергонезалежності процесу).

Запропонована технологія дозволяє досягти викидів парникового газу на рівні 0,5 т/т сталі, що відповідає

цільовим завданням для чорної металургії, висунутим Міжнародною енергетичною агенцією [16], та міжнародним зобов'язанням України.

Оцінюючи ресурси кам'яного вугілля, придатного для газифікації, на рівні 22,4 млрд т, запаси магнетитової руди на рівні 5 млрд т і наявні та потенційні ресурси високоякісного окатишу для виробництва заліза прямо-

го відновлення на рівні 41-47 млн. т/рік, можна впевнено стверджувати, що Україна має потенційні можливості мінімізувати традиційну коксову металургію і перейти переважно на безкоксу «зелену» металургію, яка базується на запропонованій технології газифікації вітчизняного вугілля з одночасним отриманням водню.

Таблиця 7

Техніко-економічні показники виробництва заліза прямого відновлення при сумісному використанні газифікації кам'яного вугілля і процесу електролізу води

Показники	Одиниці виміру	Числові значення
Обсяг переробки кам'яного вугілля	тис т/рік	550,0
Об'єм отриманого за газифікації синтез-газу	млн м ³	930
Кількість водню, що додається для досягнення співвідношення H ₂ :CO=2:1	млн м ³	643
Загальна кількість синтез-газу, збагаченого воднем	млн м ³	1573
В т.ч. кількість водню	млн м ³	968,5
Кількість заліза, яке може бути отримане за використання одержаного синтез-газу	тис т	2790
Кількість потрібних для відновлення окатишів із загальним вмістом заліза 65 %	тис т	4294
Потужність енергетичної установки	МВт	80
Виробництво електроенергії	МВт×годин/рік	700800
Потреба в електроенергії:		
Газифікація вугілля та очищення води		12621
Електроліз води (виробництво 643 млн м ³ водню)		405350
Вільні ресурси електроенергії		282829

Висновки

1. Головним напрямком подальшого розвитку української чорної металургії має бути отримання губчатого заліза шляхом прямого відновлення залізної руди та одержання з губчастого заліза сплавів із заданими властивостями в електропечах.

2. Як відновник заліза доцільно використовувати синтез-газ, отриманий шляхом газифікації малометаморфованого вугілля та збагачений воднем.

3. Джерелом енергії для отримання електролізного водню та роботи електричних печей має бути утилізація ентальпії генераторного газу, отриманого на установках високотемпературної газифікації вугілля.

4. Виробництво коксу збереже своє значення для отримання відновника для феросплавних печей та, можливо, доменного коксу для виплавки ливарного чавуну.

5. Перспективним є коксування в печах без уловлювання хімічних продуктів коксування, яке характеризується меншими капіталовкладеннями за рахунок спрощення конструкції печей та відмови від будівництва хімічних цехів, зменшення кількості шкідливих викидів в атмосферу внаслідок роботи коксових печей під роз-

рідженням, отримання як супутнього продукту електроенергії в кількості ≈ 830 кВт×годин/т отриманого валового коксу.

6. Запропонований шлях розвитку української металургії дасть можливість не лише підвищити якість металопродукції, а й зберегти вуглевидобувну промисловість і, більше того, створити нові можливості для її розвитку, забезпечивши стійкий збут продукції та прибуткову операційну діяльність.

Бібліографічний список

1. Wordsteel Association. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://worldsteel.org/data/steel-data-viewer/>.

2. Шульга І.В. Сучасні технології переробки твердих горючих копалин для створення в Україні підприємств «зеленої» металургії / І.В. Шульга, Є.І. Котлярів / Сучасні технології переробки паливних копалин: тези доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 16-17 квітня 2025 р. – Харків: ТОВ «Планета-Прінт». – 184 с. С. 18-23 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://worldsteel.org/data/steel-data-viewer/> <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/82>

da5855-f576-4b2a-ba8c-2f616bfff68b3/content?trackerId=38008a23499b3f11.

3. **GMK Center.** Обмеження на експорт брухту у світі-2025 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://worldsteel.org/data/steel-data-viewer/https://gmk.center/wp-content/uploads/2025/04/Scrap-Restrict-2025_ukr-2.pdf.

4. **Гороновський І.Т.** Короткий довідник з хімії / **І.Т. Гороновський, Ю.П. Назаренко, Є.Ф. Некряч.** – Київ: Наукова думка, 1987. – 829 с.

5. **Скляр М.Г.** Вугілля України та його місце у паливно-енергетичному, металургійному та хімічному комплексах країни / **М.Г. Скляр** // Вуглехімічний журнал. – 1995. – № 1-2. – С. 3-10.

6. **Успенський С.К.** Концепція розвитку чорної металургії України. Коксохімічне виробництво / **С.К. Успенський** // Вуглехімічний журнал. – 1995. – № 1-2. – С. 14-18.

7. **Sklyar M.G.** About the development of the coal processing industry in Ukraine / **M.G. Sklyar, A.G. Starovoyt** // *Coke and chemistry*. – 1997. – No. 1. – P. 2-9.

8. **Кравченко С.О.** Аналіз обсягу виробництва та якості коксу у 2020 році українських коксохімічних підприємств / **С.О. Кравченко, О.В. Туркіна, С.В. Чаплянко, А.Г. Старовойт** // Вуглехімічний журнал. – 2022. – № 4. – С. 16-21. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2022-0-4-16-21>.

9. **Шульга І.В.** Інструкція з розрахунку виробничої потужності коксохімічних підприємств та виробництв / **І.В. Шульга, Л.П. Банніков.** – Харків: ДП «УХІН», 2014. – 80 с.

10. **Мукіна Н.В.** Підготовка вугільної шихти до коксування в умовах комплексу коксових батарей № 5, 6 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» / **Н.В. Мукіна, О.П. Чернусова, Д.В. Мірошніченко [та ін.]** // Вуглехімічний журнал. – 2021. – № 3. – С. 8-20. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2021-0-3-8-20>.

11. Дніпровський метзавод проведе масштабну модернізацію виробництва / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://biz.nv.ua/ukr/markets/yaroslavskiy-planuyemasshtabnu-transformaciyu-zavodu-u-dnipri-zakriye-chastinupotuzhnostey-50513907.html>.

12. Державна служба статистики. Зовнішня торгівля окремими видами товарів за країнами світу / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ukrstat.gov.ua/operativ2024/zd/e_iovt/arh_iovt2024.htm.

13. ТОВ «МЕТІНВЕСТХОЛДІНГ». Офіційний сайт / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://metinvestholding.com/en-us/>.

14. **Кизим М.О.** Розвиток ресурсозберігаючих технологій металургійного виробництва на основі українського вугілля / **М.О. Кизим, В.Є. Хаустова, Є.І. Котляров, І.В. Шульга** // Вуглехімічний журнал. – 2024. – № 3. – С. 14-22. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2024-0-3-14-22>.

15. **Шульга І.В.** Устаткування підприємств з переробки твердих горючих копалин : навч. посібник / **І.В. Шульга, Д.В. Мірошніченко.** – Харків – Тернопіль: Крок, 2022. – 209 с.

16. *International energy agency. Iron and Steel Technology Roadmap Towards more sustainable steelmaking, 2020, 190 p.* / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187/cecal189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf.

17. **Шульга І.В.** Напрямки удосконалення технологій конверсії вугілля в синтетичні рідкі палива / **І.В. Шульга, М.О. Кизим, Є.І. Котляров** // Вуглехімічний журнал. – 2023. – № 6. – С. 37-44. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-6-37-44>.

18. Патент України № 156530. **Шульга І.В., Кизим М.О., Хаустова В.Є., Котляров Є.І.** Спосіб отримання синтетичних моторних палив з вугілля. // Бюл. ДП УКРНОІВІ. – 2024. – № 27.

19. **Кравченко С.О.** Аналіз обсягу виробництва українськими коксохімічними підприємствами коксового газу у 2020 році / **С.О. Кравченко, О.В. Туркіна, С.В. Чаплянко [та ін.]** // Вуглехімічний журнал. – 2022. – № 6. – С. 13-17. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2022-0-6-13-17>.

20. Вугілля буде не потрібне. У Швеції побудують завод із виробництва зеленої сталі / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecoburougcc.org.ua/index.php/ekologija-zhittja/alternativna-energetika/7816-vugillya-budene-potribne-u-shvetsiji-pobuduyut-zavod-iz-virobniustva-zelenoji-stali>

21. **Хаустова В.Є.** Обґрунтування створення виробництва синтетичного моторного палива з вугілля в Україні / **В.Є. Хаустова, М.О. Кизим, Є.І. Котляров, І.О. Губарева, В.В. Шпілевський, Т.І. Салащенко, Д.М. Костенко, М.М. Хаустов.** – Харків: ФОП Лібуркіна Л.М., 2024. – 514 с.

Рукопис надійшов до редакції 08.09.2025

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-4-3-13

Specialty 161, 51. U.D.C. 669+662.73+338.28. JEL: L60; L70

DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF COKE AND NON-COKE METALLURGY

© V.Ye. Khaustova¹, M.O. Kyzym², Ye.I. Kotlyarov³

Research Centre for Industrial Development Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine (RCIDP of NASU), 611661, Kharkiv, 1a Inzhenery Lane, Ukraine

I.V. Shulga⁴

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

¹ Khaustova Viktoria Yevgenivna, Doctor of Economics, Prof., Director, e-mail: v.khaust@gmail.com

² Kyzym Mykola Oleksandrovych, Doctor of Economics, Prof., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Chief Researcher, e-mail: m.kyzym@gmail.com

³ Kotlyarov Yevgen Ivanovich, Ph.D. in Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Economic Security and Energy Conservation Sector, e-mail: ekotlarov@i.ua

⁴ Shulga Igor Volodymyrovych, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Head of the Coke Department, e-mail: ko@ukhin.org.ua

The article is devoted to a comparison of possible directions for the development of the metallurgical sector of the Ukrainian economy.

It has been shown that well-founded scientific and practical proposals for the post-war restoration of Ukraine's metallurgical industry based on green technologies: direct reduction of iron and production of alloys with specified properties in electric furnaces. Hydrogen-enriched generator gas from coal is proposed as a reducing agent. The source of energy for electric furnaces and enrichment of generator gas with electrolytic hydrogen is electricity from the utilization of the enthalpy of the generator gas obtained. Coke production will retain its importance for the production of ferroalloy coke and, possibly, blast furnace coke for smelting cast iron. At the same time, the production of coke in furnaces without the capture of chemical products is promising, which, unlike coking in regenerative furnaces under excess pressure, is carried out in furnace chambers under vacuum, which significantly reduces emissions of pollutants into the environment. The use of hydrogen to recover metals from ores will also significantly reduce greenhouse carbon dioxide emissions. Low-metamorphosed coal (brown, long-flamed and gas) is most suitable for chemical and technological processing. The destruction of most coal-fired power generation has led to a surplus of coal mined in Ukraine. Therefore, the development of metallurgy based on the use of low-metamorphic coal will not only provide the country with high-quality metal products, but also preserve the coal mining industry and, moreover, create new opportunities for its development, ensuring stable sales of products and profitable operations.

Keywords: green metallurgy, direct iron reduction, low-metamorphosed coal, coal gasification, coking, coke ovens, chemical product capture, two-product coking.

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

Manuscript received 2025/09/08

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-4-13-20

Спеціальність 161. УДК 662.74

ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ СІРКОВМІСНИХ 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.ua

² Шульга Ігор Володимирович, канд. техн. наук, доц., с.н.с., зав. коксового відділу, e-mail: ko@ukhin.org.ua

³ Телешев Юрій Володимирович, канд. техн. наук, e-mail: 196112juv@gmail.com

⁴ 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 сірковмісного вторинного продукту – автоклавного бруду цеху миш'яково-содового сіркоочищення. Від загальної маси автоклавного бруду 39,7 % складає елементна сірка, що за температур більше 444,6 °С переходить до газоподібного стану, а також реагує з продуктами термічної деструкції вугілля. Припустима кількість внесеного до шихти автоклавного бруду з умов зростання сірчистості отримуваного коксу на $\leq 0,1$ % складає 0,235 % від маси шихти. В парогазовій фазі сірка розподілюватиметься між сірководнем коксового газу, сірчистими сполуками кам'яновугільної смоли та сирого бензолу. Збільшення вмісту сірководню в коксовому газі складе 2,65 г/м³, а з урахуванням усереднення за промислових умов внесеного автоклавного бруду та продуктів його термохімічних перетворень за транспортування і коксування шихти та переробки коксового газу ця ж величина дорівнюватиме 0,742 г/м³, що, в свою чергу, також може призвести до збільшення кількості утвореного автоклавного бруду. Однак накопичення з'єднань сірки в прямому коксовому газі не відбуватиметься через вивід в цеху сіркоочищення баластних солей з циклу циркулюючого поглинального розчину внаслідок проведення реакцій нейтралізації. З баластним розчином виводиться не менш ніж в 60 разів більше елементної сірки, аніж накопичується внаслідок внесення до шихти автоклавного бруду. Очікуване збільшення сірчистості смоли та сирого бензолу розраховували з урахуванням усереднення цих продуктів у сховищах цеху уловлювання, тобто за кількістю утвореного автоклавного бруду. Збільшення сірчистості смоли складає 0,06 %. Вміст сірковуглецю в сирому бензолі зростає на 0,03 %, тіофену – на 0,02 %, сірководню – на 0,005 %, елементної сірки – на 0,001 %, меркаптану – на 0,003 %. Тобто, зміна властивостей смоли та сирого бензолу є незначною. Аналогічним чином відбуватимуться термохімічні перетворення елементної сірки, що вноситься до шихти з іще одним супутнім продуктом – пилом газової сірки, утвореним за транспортування та перевантаження цього продукту. Гранична кількість сірчаного пилу, що додається до шихти, має визначатись з умови збільшення сірчистості шихти не більш ніж на 0,1 %.

Ключові слова: охорона довкілля, коксохімічне виробництво, коксування, вторинні сировинні ресурси, супутні продукти, сіркоочищення, автоклавний бруд.

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

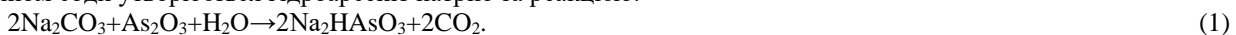
Найбільш ефективним для коксохімічних підприємств є спосіб утилізації (знешкодження) супутніх продуктів (відходів) введенням їх в шихту для коксування з дотриманням вимог, що забезпечують збереження основних фондів, попереджують погіршення якості отримуваної продукції та екологічних показників [1]. На підставі цього нами раніше [2] були сформульовані основні принципи створення маловідходних технологій виробництва коксу шляхом повторного використання у складі вугільних шихт отримуваних вторинних продуктів коксування, наприклад, кам'яновугільних фусів [3].

Метою дослідження є обґрунтування можливості повторного використання сірковмісних 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 автоклавного бруду, утвореного за миш'яково-содового очищення коксового газу від сірководню.

ДП «УХІН» була розроблена термохімічна технологія утилізації супутніх продуктів коксохімічного виробництва з використанням камер коксування [4]. При цьому визначені кількості різних видів супутніх продуктів, утворених за конкретних умов підприємства, розроблена технологія їх підготовки до утилізації, проведені дослідні лабораторні коксування шихт з додаванням супутніх продуктів, розроблені схема та технологічні параметри утилізації супутніх продуктів. Це дало можливість проведення на одному з провідних коксохімічних підприємств України дослідно-промислових робіт для підтвердження головних положень розробленої технології за утилізації автоклавного бруду, отриманого за миш'яково-содового очищення коксового газу від сірководню.

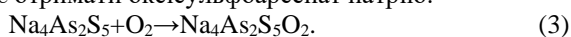
При миш'яково-содовому очищенні коксового газу від сірководню [5] за змішування оксиду миш'яку (III) з розчином соди утворюється гідроарсеніт натрію за реакцією:



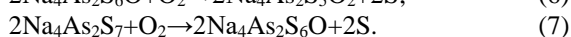
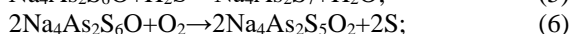
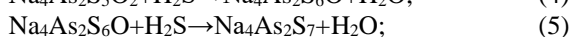
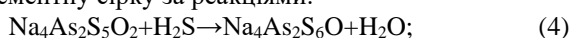
Отриманий розчин обробляють поза робочим циклом прямим коксовим газом, що містить сірководень, при цьому відбувається реакція:



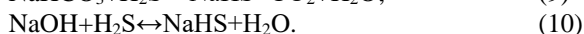
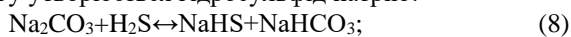
Продування отриманого розчину повітрям окислює трьохвалентний миш'як до п'ятивалентного, що дозволяє отримати оксисульфоарсенат натрію:



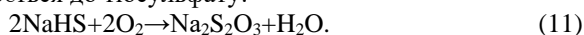
Сутність миш'яково-содового процесу сіркоочищення полягає в хімічному зв'язуванні сірководню оксисульфоарсенатом натрію з утворенням сульфоарсенату натрію, який за регенерації киснем повітря знов окислюється до оксисульфоарсенату натрію та виділяє елементну сірку за реакціями:



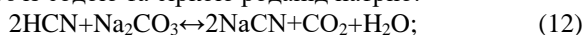
Разом з основними реакціями за поглинання та регенерації відбуваються й побічні, зокрема, за надлишку луку утворюється гідросульфід натрію:



За регенерації розчину гідросульфід частково окислюється до тіосульфату:

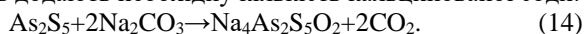


Ціановодень, що міститься в коксовому газі, утворює із содою та сіркою роданід натрію:



Тіосульфат та роданід натрію, що накопичуються в поглинальному розчині, є нерегенованими баластними сполуками.

Отримана сірка разом із сульфідом миш'яку (т.зв. «сірчана паста») відфільтровується з регенованого поглинального розчину і далі надходить на зневоднення до плавильнику-автоклаву, де нагрівається глухою та гострою парою. Для зв'язування сульфідів миш'яку, що виділяється за нагрівання сірчистої пасти, в автоклав додають необхідну кількість кальцинованої соди:



Розплавлена маса за відстоювання в автоклаві розділяється на три шари:

– нижній – чиста сірка;

– середній – забруднена домішками сірка (т.зв. «автоклавний бруд»);

– верхній – водний конденсат.

Розплавлена сірка з нижньої частини автоклаву віджимається до монжусу, і далі спрямовується на подальшу переробку в товарний продукт. Водний конденсат з верхньої частини надходить на поповнення водного циклу цеху сіркоочищення. Таким чином, в автоклаві

залишається лише автоклавний бруд, що і є супутнім продуктом коксування, який підлягає утилізації.

За підготовки до проведення робіт була обстежена існуюча установка з подачі супутніх продуктів на конвеєр шихти В-10 другого блоку вуглепідготовчого цеху заводу. Бункер знаходився в робочому стані, наявний затвор дозволяв здійснювати ручне дозування супутніх продуктів, що подаються до шихти. Однак на установці відсутні необхідні засоби механізації (шнек та система регулювання), які дозволяють подавати супутні продукти до шихти в заданій кількості без присутності там виробничого персоналу. Немає також пари на обігрів бункера, що може призвести до ускладнень у подачі супутніх продуктів в холодну пору року.

Тому для поліпшення відтворності дослідно-промислового експерименту, підготовки до промислового впровадження в повному обсязі розробленої термохімічної технології утилізації супутніх продуктів коксохімічного виробництва з використанням камер коксування, створення при цьому безпечних та нешкідливих умов праці, запобігання додатковим викидам шкідливих речовин у довкілля була розроблена та реалізована низка організаційно-технічних заходів:

1. Автоматизація подачі супутніх продуктів з бункеру-накопичувачу другого блоку вуглепідготовчого цеху на стрічку конвеєра В-10 з метою виключення присутності виробничого персоналу в цій зоні за подачі відходів до шихти.

2. Окожування всіх місць перепаду шихти з додаванням супутніх продуктів за їх перевантаження з конвеєру на конвеєр, забезпечення працездатності наявної системи вентиляції на другому блоці вуглепідготовчого цеху та улаштування місцевої вентиляції в зоні подачі супутніх продуктів до шихти.

3. Ревізія наявної системи автоматизації роботи верху вугільних башт другого блоку для зведення до мінімуму присутності там виробничого персоналу.

4. Ревізія форсунок бездимного завантаження шихти та забезпечення потрібного тиску пари на інжекцію з тим, щоб розрідження у середньому завантажувальному люці за планування складало не більше 100 Па (10 мм вод ст), в т.ч. і в холодну пору року.

5. Правильна експлуатація, своєчасна ревізія, технічне обслуговування та ремонт дверей коксових печей, планірних лючків, завантажувальних люків та кришок стояків для забезпечення їх газоцильності.

6. Регулярна ревізія та за необхідності усунення свищів у газопроводах коксового газу з метою забезпечення їх герметичності.

З урахуванням реальних виробничих умов методика проведення дослідно-промислового експерименту має передбачати приготування дослідної шихти з додаванням супутнього продукту (автоклавного бруду) та зіставної шихти (без додавання супутнього продукту).

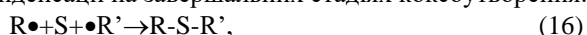
Кількість доданого до шихти супутнього продукту встановлюється у відповідності з результатами лабораторних досліджень [4]. Дозування відходів здійснювалось вручну за допомогою секторного затвору, яким обладнаний бункер для подачі супутніх продуктів. Кожен варіант шихти окремо закачувався до спеціально виділеної кишені однієї з вугільних башт другого блоку коксового цеху. При закачуванні шихти відбирають її представницьку пробу для оцінки її властивостей. Дослідною шихтою завантажували не менше п'яти камер коксування однієї серії, які не мають дефектів кладки та суттєвих особливостей в технології завантажування, планування і обігріву. Для обраної дослідної камери виконували виміри температур у вертикальних опалювальних каналах за довжиною десяти суміжних (по п'ять з кожного боку) опалювальних простінків. Під час коксування дослідних шихт відбирали та аналізували проби коксового газу.

Кокс з дослідних камер гасився, витримувався на рампі та сортувався за прийнятою на підприємстві технологією. За відвантаження доменного коксу в залізничний піввагон здійснювався відбір представницької проби та її випробування за стандартними методиками (технічний аналіз та механічна міцність) у ВТК та ЦЗЛ заводу.

Виконаними раніше в лабораторних умовах дослідженнями [4] було встановлено, що вміст елементної сірки в автоклавному бруді становить 39,7 %. З цієї кількості 95,11 % (відн.) сірки, що міститься в автоклавному бруді (елементна сірка), переходить в парогазові продукти, наприклад:



Решта сірки (4,89 % відн.) лишається в коксі, переважно утворюючи сірчані містки під час реакцій поліконденсації на завершальних стадіях коксоутворення:



де $\text{R}\bullet$ та $\bullet\text{R}'$ – вільні радикали, що утворюються за термічної деструкції органічної маси вугілля.

Сірка є найшкідливішим компонентом, що вноситься з коксом в доменну піч [6]. В сплавах заліза сірка входить до складу сульфиду заліза [7]:



В свою чергу, сульфід заліза утворює із залізом евтектичну суміш, яка починає плавитись за температур червоного гартування заліза (≈ 950 °C). Це призводить до т.зв. «червоноламкості» металевих виробів. За збільшення сірки, яка надходить з коксом в доменну піч, потрібна додаткова кількість флюсів для хімічного зв'язування хоча б частини її:



Можлива також позадоменна десульфурація отриманого чавуну, наприклад, за допомогою магнею:

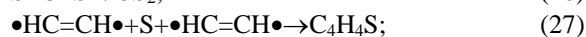
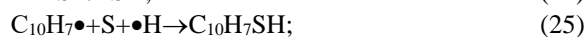
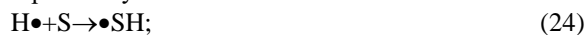


Проте позадоменна десульфурація також в кінцевому підсумку призводить до зростання експлуатаційних витрат.

Виходячи з цього, граничну кількість внесеного до шихти автоклавного бруду визначали з умови зростання сірчистості коксу не більш ніж на 0,1 %. Ця кількість складає 0,235 % від маси шихти (зверх 100 %). Від ресурсів елементної сірки 88,7 % (відн.) переходить у сірководень коксового газу за реакцією (15), що, призводить до збільшення вмісту сірководню в газі на 2,65 г/м³, а з урахуванням усереднення газу, отриманого на всіх батареях заводу, має призвести до збільшення вмісту сірководню в газі на вході до цеху миш'яководного сіркоочищення на 0,7 г/м³.

В свою чергу, це також може призвести до збільшення кількості утворюваного автоклавного бруду. Проте накопичення з'єднань сірки в прямому коксовому газі не відбувається, оскільки в цеху сіркоочищення баластних солей виводиться з циклу циркулюючого поглинального розчину внаслідок проведення операцій нейтралізації в 60 раз більше (рахуючи на елементну сірку), аніж накопичується внаслідок внесення до шихти автоклавного бруду.

Частина елементної сірки витрачається на утворення сірковмісних сполук кам'яновугільної смоли та сирого бензолу, наприклад, тіонафтену, сірковуглецю, тіофену та меркаптану:



Але у ході виконання робіт на другому блоці вуглепідготовчого цеху було встановлено, що наявний затвор бункера супутніх продуктів не дозволяє забезпечити подачу в шихту такої малої кількості добавки (0,235 % зверх 100 %). Тому автоклавний бруд подавали до шихти у мінімально можливій кількості, що забезпечувало стабільне дозування. Для цього була встановлена величина прозору між затвором та стінками бункера 20 мм. Сходження автоклавного бруду забезпечували за допомогою наявного на бункері вібратору, а за неможливості і цього – вручну. При цьому партія автоклавного бруду масою 5,7 т (ця маса була визначена шляхом зважування порожнього та завантаженого самоскиду, що використовується для перевезення супутніх продуктів) була подана в шихту за 42 хв. З урахуванням продуктивності другого блоку вуглепідготовки за шихтою (650 т/годину) було приготовлено 455 т шихти з вмістом домішки 1,25 % (зверх 100 %), тобто в 5,33 рази більше визначеної на підставі лабораторних досліджень кількості. Такої маси дослідної шихти достатньо для завантаження 28 печей батареї № 6 з ураху-

ванням величини разового завантаження ≈ 16 т. Ця батарея була обрана для проведення дослідних коксувань

як та, що має найліпший технічний стан серед всіх батарей другого блоку підприємства.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика дослідної та зіставної шихти

Показники	Одиниці виміру	Числові значення	
		Дослідна шихта	Зіставна шихта
Робоча вологість W_t	%	10,0	9,4
Технічний аналіз:	%		
Зольність сухої маси A^d		8,0	8,0
Сірчистість загальна сухої маси S_t^d		2,80	2,11
Вихід летких речовин із сухої маси V^d		25,5	26,6
Вихід летких речовин із сухої знезоленої (горючої) маси V^{daf}		27,7	28,9
Пластометричні показники	мм		
Пластометрична усадка	x	47	42
Товщина пластичного шару	y	12	14

З урахуванням вмісту добавки до шихти 1,25 % автоклавного бруду (зверх 100 %) та сірчистості автоклавного бруду 39,7 % слід очікувати збільшення сірчистості шихти на 0,50 %. В табл. 1 наведені результати аналізу представницьких проб дослідної та зіставної шихти.

Як зіставна була прийнята виробнича шихта другого блоку за зміну, що безпосередньо передувала проведенню досліджень. Як видно з наведених даних, дослідна шихта в порівнянні із зіставною мала практично однакову зольність, однак більшу сірчистість, яка для дослідної шихти зросла на 0,69 %. Деяке розходження розрахункової та фактичної різниці в сірчистості двох шихт (0,50 % та 0,69 %) зумовлене нестабільністю властивостей доданого до шихти автоклавного бруду, а також складністю забезпечення рівномірних властивостей дослідної шихти з використанням наявного устат-

кування другого блоку вуглепідготовчого цеху. Через специфічні властивості домішки (висока вологість, повна відсутність спікливості) дослідна шихта мала більшу вологість, менші вихід летких речовин та товщину пластичного шару, але більшу пластометричну усадку.

Дослідною шихтою були завантажені 28 камер батареї № 6, яка працювала на серійності 9-2: з печі № 642 по піч № 631. Період коксування складав 22 години. Як дослідна була прийнята піч № 632.

Були досліджені властивості продуктів, отриманих за коксування виробничих шихт з додаванням автоклавного бруду на батареї № 6. Результати аналізу представницьких проб дослідного (отриманого з шихти з домішкою) та зіставного (з шихти без домішки) коксу наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика дослідного та зіставного коксу (%)

Показники	Числові значення	
	Дослідний кокс	Зіставний кокс
Технічний аналіз:		
Зольність сухої маси A^d	11,7	11,6
Сірчистість загальна сухої маси S_t^d	1,98	1,90
Механічна міцність:		
Опір подрібнювальним зусиллям M_{25}	85,8	86,1
Стиранність M_{10}	7,8	7,5
Ситовий склад:		
Більше 80 мм	13,9	11,7
Менше 25 мм	2,4	2,4

Аналіз наведених даних свідчить про те, що і дослідний, і зіставний кокс були близькими за своїми влас-

тивостями, хоча в цілому якість дослідного коксу була дещо гіршою: зольність його збільшилась на 0,1 %, опір

подрібнювальним зусиллям M_{25} знизився на 0,3 %, стиранність M_{10} збільшилась також на 0,3 %, вміст класу крупності більше 80 мм збільшився на 2,2 %. Головна причина такого погіршення – перевищення припустимої кількості доданого автоклавного бруду до шихти. Лабораторними дослідженнями була показана можливість введення в шихту до 0,24 % [4] автоклавного бруду, в той же час за дослідно-промислових робіт до шихти було подано 1,25 % автоклавного бруду, тобто в 5,33 рази більше.

Найсуттєвіші відмінності у властивостях дослідного та зіставного коксу виявились у їх сірчистості: у дослідного коксу вона була на 0,08 % вищою. З урахуванням виходу сухого валового коксу від сухої шихти 77 % та збільшення сірчистості шихти за введення автоклавного бруду на 0,6 % відносна кількість сірки з доданого автоклавного бруду, що залишилась в коксі, складає:

$$\frac{0,08 \times 77}{69} = 8,9 \% \quad (29)$$

Решта сірки (91,1 %) переходить до парогазових продуктів, що достатньо добре співпадає з лабораторними та розрахунковими даними (95,1 % [4]). По відношенню до маси шихти кількість сірки, яка додатково переходить в газ, складає:

$$\frac{0,69 \times 91,1}{100} = 0,63 \% \quad (30)$$

де 0,69 – збільшення сірчистості шихти за дослідно-промислового експерименту (див. табл. 1).

Це призводить до збільшення кількості утвореного сірководню на:

$$\frac{0,63 \times 34}{32} = 0,668 \% \quad (31)$$

де 34 – мольна маса сірководню, кг/кмоль; 32 – атомна маса сірки, кг/кмоль атомів.

Тобто, в розрахунку на 1 т шихти додатково утворюється 6,68 кг (6680 г) сірководню. За виходу коксового газу від шихти 330 м³/т збільшення вмісту сірководню в газі з дослідних печей складає в г/м³:

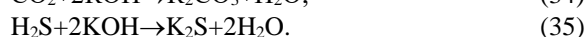
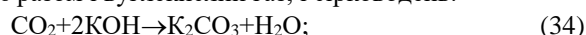
$$\frac{6680}{330} = 20,2 \quad (32)$$

В цілому по батареї збільшення вмісту сірководню з урахуванням усереднення прямого газу складає, г/м³:

$$\frac{20,2 \times 28}{65} = 8,72 \quad (33)$$

де 28 – кількість печей, в які була завантажена шихта з добавкою; 65 – загальна кількість працюючих печей на батареї.

Через те, що за дослідно-промислових умов має місце розбавлення отриманого за коксування дослідних шихт прямого коксового газу аналогічним продуктом з печей, де коксується шихта без добавки, зміну властивостей отриманого коксового газу досліджували в умовах лабораторної печі ДП «УХІН» [8] за коксування відібраної в період проведення дослідно-промислових експериментів виробничої шихти, та такої ж шихти з додаванням автоклавного бруду в кількості 1,25 % (зверх 100 %), як це мало місце за промислових умов батареї № 6. За аналізу складу отриманого газу волюмометричним методом [9] 33 %-вий розчин луку поглинає разом і вуглекислий газ, і сірководень:



Для того, щоб розділити ці компоненти і таким чином визначити вміст вуглекислого газу в очищеному коксовому газі, для поглинання суміші вуглекислого газу та сірководню використовували склянку зі свіжим поглинальним розчином. Після поглинання відбирали аліквотну частку використаного поглинального розчину, з якої визначали сульфід-іон титруванням розчином йоду з використанням як індикатору крохмального розчину:



Визначений за допомогою титрування вміст сульфід-іону після перерахунку на сірководень віднімали від визначеної сумарної кількості вуглекислого газу та сірководню, після чого знов перераховували вміст компонентів очищеного коксового газу на суму 100 %. Отримані таким чином склади газу наведені в табл. 3. Як видно з цих даних, властивості отриманого коксового газу змінюються несуттєво.

За зміни властивостей хімічних продуктів (смоли та сирого бензолу) слід враховувати їх усереднення в сховищах цеху уловлювання, тобто використовувати дані про кількість утвореного автоклавного бруду, а не кількість його, введеного до шихти. За результатами лабораторних досліджень [4], ці зміни за утилізації в шихті автоклавного бруду також будуть незначними: сірчистість смоли зростає на $\leq 0,03$ %, в сирому бензолі вміст сірковуглецю збільшиться на $\leq 0,03$ %, тіофену - на $\leq 0,02$ %, сірководню – на $\leq 0,005$ %, меркаптану – на $\leq 0,003$ %, елементної сірки – на $\leq 0,001$ %.

Таблиця 3

Склад очищеного коксового газу, %

Шихта	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C _m H _n	N ₂	O ₂
З добавкою	69,1	22,9	3,0	0,1	0,1	3,6	0,7
Без добавки	67,5	24,3	4,2	0,3	0,6	2,6	0,5

Таким чином, експериментально підтверджена можливість утилізації в складі шихти для коксування výro-

бничих відходів без суттєвих змін якості коксу та хімічних продуктів коксування. В той же час для зведення

до мінімуму таких змін слід забезпечити надійне дозування відходів у шихту шляхом реалізації в повному обсязі викладених вище рекомендацій, а також здійснення спеціальних організаційних заходів – розробку раціонального графіку утилізації супутніх продуктів та контроль за його виконанням.

Аналогічним чином відбуватимуться термохімічні перетворення елементної сірки, що вноситься до шихти з ще одним супутнім продуктом – пилом газової сірки, утворюваним за транспортування та перевантаження цього продукту. Гранічна кількість сірчаного пилу, що додається до шихти, має визначатись з умови збільшення сірчистості шихти не більш ніж на 0,1 %.

Висновки

1. На підставі сформульованих раніше основних принципів використання відходів за виробництва коксу здійснені дослідження з утилізації у складі вугільних шихт найбільш сірчистого супутнього продукту виробництва коксу – автоклавного бруду, утворюваного за миш'яково-содового очищення коксового газу від сірководню.

2. Обґрунтована раціональна кількість автоклавного бруду, доданого до шихти – $\approx 0,25$ % від маси шихти (зверху 100 %). Це дозволяє повністю утилізувати всю кількість утворюваного відходу.

3. Дослідно-промисловими роботами встановлено, що додавання автоклавного бруду до виробничої шихти в зазначеній кількості практично не змінює властивості отриманого коксу.

4. Аналогічним чином може виконуватись і утилізація пилу газової сірки, утворюваного за транспортування та перевантаження цього продукту.

Бібліографічний список

1. **Борисенко О.Л.** Термічне знешкодження в коксових печах відходів коксохімічних підприємств // Вуглехімічний журнал. – 2009. – № 5-6. – №. 59-69.

2. **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.19-26. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2025-0-1-19-26>

3. **Борисенко О.Л.** Використання супутніх смололивних продуктів у складі вугільних шихт для коксування / **О.Л. Борисенко, І.В. Шульга, Ю.В. Телешев, Є.І. Котлярів** // Вуглехімічний журнал. – 2025. – № 3. – С.3-12. <https://doi.org/10.31081/1981-309X-2025-0-3->

4. **Торяник Е.І.** Розробка термохімічної технології утилізації відходів виробництва ВАТ «Маркохім» з використанням камер коксування / **Е.І. Торяник, І.В. Шульга [та ін.]**. / Звіт. НДР 42.99. – Харків: УХІН, 1999. – 78 с.

5. **Гребенюк О.Ф.** Уловлювання хімічних продуктів коксування. Ч. 2 / **А.Ф. Гребенюк, В.І. Коробчанський, Г.А. Власов, С.І. Кауфман**. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2002. – 228 с.

6. **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.

7. **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.

8. **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.

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

Рукопис надійшов до редакції 08.07.2025

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-4-13-20

Specialty 161. U.D.C. 662.74

USE OF SECONDARY SULPHUR-CONTAINING 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

Research Centre for Industrial Development Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine (RCIDP of NASU), 611661, Kharkiv, 1a Inzhenerny Lane, Ukraine



¹ Borysenko Oleksandr Lyudvikovych, 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 Kotlyarov Yevgen Ivanovich, Ph.D. in Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Economic 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, experimental and industrial coking of coal charges with the addition of a sulphur-containing secondary product – autoclave mud from the arsenic-soda sulphur purification shop – has been carried out. Elemental sulphur accounts for 39.7% of the total mass of autoclave mud, which turns into a gaseous state at temperatures above 444.6 °C and also reacts with the products of thermal destruction of coal. The permissible amount of autoclave mud added to the charge, provided that the sulphur content of the coke obtained does not exceed 0.1%, is 0.235% of the charge mass. In the steam-gas phase, sulfur will be distributed between hydrogen sulfide in coke oven gas, sulfur compounds in coal tar, and raw benzene. The increase in hydrogen sulfide content in coke oven gas will be 2.65 g/m³, and taking into account the averaging under industrial conditions of the autoclave mud introduced and the products of its thermochemical transformations during the transportation and coking of the charge and the processing of coke oven gas, this same value will be 0.742 g/m³, which, in turn, may also lead to an increase in the amount of autoclave mud formed. However, the accumulation of sulphur compounds in direct coke oven gas will not occur due to the removal of ballast salts from the circulating absorption solution cycle in the desulphurization workshop as a result of neutralization reactions. At least 60 times more elemental sulphur is removed with the ballast solution than is accumulated as a result of adding autoclave mud to the charge. The expected increase in the sulphur content of resin and raw benzene was calculated taking into account the averaging of these products in the storage facilities of the capture workshop, i.e. based on the amount of autoclave mud formed. The increase in the sulphur content of resin is 0.06 %. The content of carbon disulphide in crude benzene increases by 0.03 %, thiophene by 0.02 %, hydrogen sulphide by 0.005 %, elemental sulphur by 0.001 %, and mercaptan by 0.003 %. That is, the change in the properties of tar and crude benzene is insignificant. Similarly, thermochemical transformations of elemental sulphur added to the charge with another associated product, gas sulphur dust formed during the transportation and transshipment of this product, will occur. The maximum amount of sulphur dust added to the charge should be determined based on the condition that the sulphur content of the charge does not increase by more than 0.1 %.

Keywords: environmental protection, coke chemical production, coking, secondary raw materials, by-products, sulphur purification, autoclave dust.

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

Manuscript received 2025/07/08

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-4-20-27

Спеціальність 161. УДК 665.775

ВИКОРИСТАННЯ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ БУРОГО ВУГІЛЛЯ ЯК МОДИФІКАТОРІВ ДОРОЖНІХ БІТУМІВ

© Ю.В. Присяжний¹, М.І. Донченко², Т.А. Чіпко³, М.В. Григораш⁴, С.В. Пиш'єв⁵

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

¹ Присяжний Юрій Володимирович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри хімічної технології переробки нафти та газу (ХТНГ), e-mail: yurii.v.prysiazhnyi@lpnu.ua

² Донченко Мирослава Ігорівна, Ph.D., асистент кафедри ХТНГ, e-mail: KhTNN.dept@lpnu.ua

³ Чіпко Тарас Андрійович, аспірант кафедри ХТНГ, e-mail: KhTNN.dept@lpnu.ua

⁴ Григораши Микола Володимирович, студент кафедри ХТНГ, e-mail: KhTNH.dept@lpnu.ua

⁵ Пиш'єв Сергій Вікторович, докт. техн. наук, проф., проф. кафедри ХТНГ, e-mail: serhii.v.pyshiev@lpnu.ua

У роботі досліджувалось використання гумінових кислот бурого вугілля як модифікаторів дорожніх нафтових бітумів. Після встановлення оптимальної кількості гумінових кислот (2,0 % мас. на сировину) та тривалості процесу перемішування (1 год) у попередніх етапах досліджень, подальші експерименти були спрямовані на вивчення впливу температури на процес модифікування. Для цього проводились дослідження за наступних температур перемішування: 120, 150 та 180 °С.

В ході цих досліджень було встановлено, що додавання гумінових кислот до бітуму значно покращує такі його властивості, як стійкість до технологічного старіння, яке здійснювалось за методом RTFOT у порівнянні зі зміною властивостей після прогрівання для вихідного зразка. Окрім цього, найбільш позитивний ефект спостерігався за температури модифікування, яка становить 120 °С. Тоді як підвищення температури до 150 та 180 °С призводить до погіршення вихідних властивостей модифікованих зразків та є недоцільним.

Наступний етап досліджень полягав у приготуванні асфальтобетонної суміші та випробування кінцевого покриття – асфальтобетону. Для порівняння, зразки асфальтобетону готували із використанням вихідного нафтового бітуму марки БНД 70/100 та бітуму, модифікованого за оптимальних умов – із додаванням 2,0 % мас. гумінових кислот, тривалості процесу 1 год. та за температури 120 °С.

Результати показали, що асфальтобетон марки АСГ.Др.Щ.А.НП.І, виготовлений із застосуванням модифікованого бітуму, характеризується покращеними фізико-механічними властивостями. Зокрема, було встановлено його підвищену міцність за умов тривалої дії води, що є особливо важливим для забезпечення довговічності дорожніх покриттів у реальних умовах експлуатації. Таким чином, отримані дані підтверджують доцільність використання гумінових кислот як доступних і екологічно безпечних модифікаторів для підвищення якості дорожніх бітумів та асфальтобетонів.

Ключові слова: буре вугілля, гумінові кислоти, модифікатор, оптимальне дозування, дорожній бітум, асфальтобетон.

Автор для листування Ю.В. Присяжний, e-mail: yurii.v.prysiashnyi@lpnu.ua

1. Вступ

Для покращення експлуатаційних властивостей бітумних в'язучих матеріалів, які застосовуються під час проектування асфальтобетонного покриття, до їх складу вводять модифікатори різного характеру дії, походження, способу застосування тощо. З огляду на широкий асортимент цих добавок зараз розрізняють такі основні їх групи: полімерні та органічні модифікатори, мінеральні добавки, поверхнево-активні речовини (ПАР), воскові та комплексні модифікатори. Кожна із цих груп забезпечує покращення конкретних характеристик в'язучого, адаптуючи його властивості до необхідних експлуатаційних вимог [1-10].

Водночас, з-поміж недоліків, якими володіє більшість сучасних промислових модифікаторів слід виділити їх високу вартість. Це зумовлює активні наукові дослідження, орієнтовані на виявлення більш доступних джерел сировини та розроблення економічно вигідних технологій модифікування дорожніх нафтових бітумів.

Одним із напрямів вказаних наукових досліджень є введення до складу в'язучих простих та природних речовин, які до того ж можуть зустрічатись безпосередньо у довкіллі. Так, останніми роками спостерігається зростання наукового інтересу до використання фосфоліпідів, аскорбінової кислоти, діатомітів, лігніну та інших речовин, як модифікаторів дорожніх бітумів [11-15].

Аналізуючи досвід використання різноманітних речовин та їх вплив на характеристики готового дорожнього покриття, авторами було запропоновано використовувати для покращення властивостей бітуму гумінові кислоти. Сировиною, з якої їх одержували, в даному випадку, було буре вугілля українського походження. На кафедрі хімічної технології переробки нафти на газу НУ «Львівська політехніка» вже проводились дослідження, пов'язані із використанням солей цих речовин – гумату калію, як бітумного модифікатора. Одержані результати засвідчили, що солі гумінових кислот проявляють сповільнюючі властивості на процеси технологічного старіння дорожнього бітуму [16-18]. Водночас дослідження щодо використання саме гумінових кислот не проводилися. Тому, дана робота присвячена:

– вивченню впливу гумінових кислот на властивості дорожнього нафтового бітуму;

– приготуванню асфальтобетонної суміші із використанням модифікованого гуміновими кислотами бітуму та випробуванню кінцевого покриття – асфальтобетону.

2. Експериментальна частина

На основі серії досліджень із використанням гумінових кислот авторами було виявлено деякі оптимальні закономірності їх поєднання з бітумом. Зокрема, максимальний позитивний вплив на бітум спостерігався, коли кількість кислот становила 2,0 % мас., а тривалість процесу модифікування – 1 год [11]. Наступний етап полягав у встановленні оптимальної температури модифікування. Для цього, виходячи з досвіду лабораторних досліджень щодо модифікування дорожнього

бітуму різними видами додатків, було підібрано три температури – 120, 150 та 180 °С.

Встановивши оптимальні показники приготування модифікованого бітуму, розробили склад асфальтобетонної суміші із отриманням асфальтобетону, який далі випробовували згідно зі стандартизованими методиками.

2.1. Вихідні матеріали

Для модифікування дорожнього нафтового бітуму гуміновими кислотами використовували:

– окиснений бітум марки БНД 70/100, відібраний на ПАТ «Укртатнафта» (м. Кременчук, Україна) з характеристиками, які наведені в табл. 1;

– гумінові кислоти бурого вугілля, показники технічного та елементного аналізу яких наведено в табл. 2 та 3.

Таблиця 1

Характеристики дорожнього нафтового бітуму марки БНД 70/100

Показник	Розмірність	Значення
Глибина проникності голки (пенетрація) за температури 25 °С	0,1 мм	78
Температура розм'якшеності	°С	52,8
Розтяжність (дуктильність) за температури 25 °С	см	58
Зчеплюваність із поверхнею скла	%	65
Зчеплюваність із поверхнею щебеню	бали	3,5
Зміна маси (після прогрівання, метод RTFOT)	%	0,086
Залишкова пенетрація (після прогрівання, метод RTFOT)	%	50,0
Зміна температури розм'якшеності (після прогрівання за методом RTFOT)	°С	6,8
Індекс пенетрації	–	0,64

Таблиця 2

Показники технічного аналізу гумінових кислот бурого вугілля

Вміст вологи W^a , % мас.	Зольність A^d , % мас.	Вміст загальної сірки S^d_t , % мас.	Вихід летких речовин V^{daf} , % мас.
9,6	7,9	3,90	52,3

Таблиця 3

Елементний склад гумінових кислот бурого вугілля

Вміст вуглецю C^{daf} , %	Вміст водню H^{daf} , %	Вміст азоту N^{daf} , %	Вміст кисню O^{daf} , %
62,34	4,63	0,77	28,36

2.2. Методики проведення експериментів і аналіз експериментальних матеріалів

Процес модифікування окисненого дорожнього нафтового бітуму гуміновими кислотами з бурого вугілля здійснювали наступним чином:

– нагрівали вказану кількість бітуму до необхідної температури модифікування;

– вмикали перемішування та встановлювали кількості обертів мішалки на сталому рівні;

– вводили необхідну кількість модифікатора та фіксували початок процесу модифікування;

– після завершення процесу вимикали нагрів та перемішування;

– визначали характеристики зразків згідно зі стандартизованими методиками.

Приготування та випробування асфальтобетонних сумішей (АБ) проводили згідно з методиками, наведеними в [19].

Визначення фізико-технологічних показників вихідного та модифікованих зразків бітуму здійснювали згідно з методиками, наведеними у відповідних нормативних документах, зокрема: глибину проникності голки (пенетрацію) за температури 25 °С визначали

згідно з [20]; температуру розм'якшеності – згідно з [21]; розтяжність (дуктильність) за температури 25 °С – згідно з [22]; зчеплюваність із поверхнею скла – за [23]; зчеплюваність із поверхнею щебеню – за [24]; зміну властивостей після прогрівання – за методом RTFOT, зокрема зміну маси, залишкову пенетрацію та зміну температури розм'якшеності – згідно з [25].

Індекс пенетрації визначали згідно з п.п. 10.6 ДСТУ EN 12607-2:2019 [26] за формулою:

$$П = \frac{20 \cdot t_{\text{розм.}} + 500 \cdot \lg П_{25} - 1952}{t_{\text{розм.}} - 50 \cdot \lg П_{25} + 120}, \quad (1)$$

де $П$ – індекс пенетрації; $t_{\text{розм.}}$ – температура розм'якшеності, °С; $П_{25}$ – пенетрація, $\text{м} \cdot 10^{-4}$ (0,1 мм).

Середню густину зразка асфальтобетону розраховували за формулою:

$$\rho_m = \frac{m \cdot \rho_w}{m_2 - m_1}, \quad (2)$$

де m – маса зразка на повітрі до зволоження, г; ρ_w – істинна густина води, $\text{г}/\text{см}^3$; m_2 – маса зразка, витриманого 30 хв. у воді та зваженого на повітрі, г; m_1 – маса зразка, витриманого 30 хв. у воді та зваженого у воді, г.

Водонасичення зразка асфальтобетону розраховували за формулою:

$$W = \frac{m_3 - m}{m_2 - m_1} \cdot 100, \quad (3)$$

де m_3 – маса насиченого водою зразка, зваженого на повітрі, г; m – маса сухого зразка, зваженого на повітрі, г; m_2 – маса зразка, витриманого 30 хв. у воді та зваже-

ного на повітрі, г; m_1 – маса зразка, витриманого 30 хв. у воді та зваженого у воді, г.

Для характеристики інтенсивності перемішування середовища при модифікуванні дорожнього бітуму гуміновими кислотами на основі рекомендації, поданої у [27], розраховували модифікований критерій Рейнольдса:

$$Re_m = \frac{\rho_e \cdot n \cdot d_x}{\nu_e}, \quad (4)$$

де n – кількість обертів мішалки, об/с. ($n=6,67$ об/с); ρ_e – густина води при 20 °С, $\text{кг}/\text{м}^3$ ($\rho_e = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$); d_x – модифікований характеристичний параметр, який характеризує конструкцію ємності модифікування бітуму і мішалки, м^2 ; ν_e – в'язкість води при 20 °С, $\text{Па} \cdot \text{с}$ ($\nu_e = 1,002 \cdot 10^{-3}$).

$$d_x = \left(\frac{D_c}{d_m} \right)^2, \quad (5)$$

де D_c – діаметр ємності у якій здійснювали модифікування, м ($D_c = 0,08$ м); d_m – діаметр мішалки, м ($d_m = 0,05$ м).

Тоді:

$$d_x = 0,016384, \\ Re_m = 109500$$

Значення модифікованого критерія Рейнольдса свідчить, що модифікування дорожнього бітуму здійснювали в турбулентному режимі.

3. Результати досліджень та їх обговорення

В табл. 4 наведено результати модифікування окисненого дорожнього нафтового бітуму марки БНД 70/100 гуміновими кислотами за температур модифікування 120, 150 та 180 °С.

Таблиця 4

Модифікування дорожнього бітуму БНД 70/100 гуміновими кислотами

№ з/п	Показник	Значення для вихідного зразка БНД 70/100	Значення для зразків, модифікованих 2,0 % мас. гумінових кислот		
			120 °С	150 °С	180 °С
1	Температура розм'якшеності за «КіК», °С	52,8	54,0	54,6	55,4
2	Пенетрація за температури 25 °С, ·0,1 мм	78	72	58	54
3	Розтяжність (дуктильність) за температури 25 °С, см	58	15	12	9,5
4	Еластичність за температури 25 °С, %	17,5	28,7	23,4	23
5	Зчеплюваність з поверхнею скла, %	65	60	67	64
6	Зчеплюваність з поверхнею щебеню, бал	3,5	3,5	3,5	3,5
7	Зміна властивостей після прогрівання за методом RTFOT:				
7.1	Зміна маси, %	0,086	0,156	0,129	0,086
7.2	Зміна температури розм'якшеності, °С	6,8	5,4	5,2	5,6
7.3	Залишкова пенетрація, %	50	68,6	69	74,1

Аналізуючи зміни показників, наведених у табл. 4, можна стверджувати наступне:

1. Збільшення температури процесу модифікування призводить до деякого погіршення термопластичних властивостей зразків. Зокрема, це можна спостерігати за зниженням пенетрації за 25 °С від 72·0,1 мм для зразка, модифікованого за 120 °С до 54·0,1 мм для зразка, модифікованого за 180 °С. Також спостерігається незначне (на 1,2-2,6 °С) збільшення температури розм'якшеності за «КіК» та стрімке зменшення розтяжності за 25 °С, яка для вихідного бітуму становить 58 см, тоді як для зразка, модифікованого за 180 °С лише 9,5 см. Можна припустити, що незначне збільшення температури розм'якшеності зразків зумовлене впливом температури процесу модифікування на структуру бітуму, тоді як гумінові кислоти не мають суттєвого впливу на цей процес;

2. З підвищенням температури модифікування адгезійні властивості зразків залишаються приблизно на сталому рівні;

3. Незначно зростає еластичність зразків, зокрема найвище значення спостерігається для зразка, модифікованого за 120 °С та становить 28,7 %;

4. З підвищенням температури процесу адгезійні властивості зразків залишаються приблизно на сталому рівні.

5. Значно покращуються властивості модифікованих зразків після прогрівання за методом RTFOT у порівнянні з вихідним зразком. Зокрема, на 1,2-1,6 °С зменшується зміна маси та значно зростає залишкова пенетрація зразків, яка є найвищою (74,1 %) для зразка, модифікованого за 180 °С.

Оскільки гумінові кислоти є твердими речовинами, а модифіковані ними бітуми характеризуються однорідністю, то можна припустити, що збільшення показника еластичності, як і покращення властивостей модифікованих зразків бітуму після прогрівання, можливе внаслідок:

1. Розчинення гумінових кислот у бітумі;

2. Хімічної взаємодії гумінових кислот з компонентами бітуму.

Вивчення характеру взаємодії гумінових кислот бурого вугілля з бітумом буде метою подальших досліджень в даному напрямку.

Підсумовуючи вищесказане можна зробити висновок, що гумінові кислоти найбільш позитивно впливають на стійкість зразків до технологічного старіння та можуть бути рекомендовані як інгібітори старіння. При цьому, спостерігаючи за загальними змінами, які відбуваються зі зразками при збільшенні температури модифікування, видно, що найбільш позитивний вплив гумінових кислот відбувається за температури 120 °С. Подальше збільшення температури призводить до погіршення вихідних властивостей модифікованих зразків та є недоцільним.

Наступний етап досліджень полягав у одержанні та випробуванні асфальтобетонної суміші і, відповідно, кінцевого покриття – асфальтобетону. Для цього використовували вихідний дорожній нафтовий бітум марки БНД 70/100 та зразок, модифікований 2,0 % мас. гумінових кислот за 120 °С. Характеристики наведені в табл. 4.

Склад асфальтобетонної суміші наведений в табл. 5, а в табл. 6 наведено фізико-механічні властивості відповідних їй асфальтобетонів марки АСГ.Др.Щ.А.НП.І.

Таблиця 5

Склад асфальтобетонної суміші

Матеріал	Вміст матеріалу в асфальтобетоні, % мас.
Щебінь фр. 10-20 мм	20,0
Щебінь фр. 5-10 мм	20,0
Щебенекий відсів фр. 0,05-5 мм	50,0
Мінеральний порошок вапняковий (марки МП І)	10,0
Разом	100,00
Бітум БНД 70/100 Або Бітум БНД 70/100 + 2,0 % мас. гумінових кислот	6,5

Аналіз експериментальних даних, наведених в табл. 6, показує, що модифікування дорожнього нафтового бітуму марки БНД 70/100 гуміновими кислотами в кількості 1,0 % мас. за температури 120 °С не змінює показники середньої густини та водонасичення за об'ємом асфальтобетонних зразків, але збільшує граничну міцність при стиску за температури 20 °С у 1,1, а за температури 50 °С – у 1,13 рази відповідно. Коефіцієнт

водостійкості за експрес-методом із використанням гумінових кислот є також у 1,13 разів вищим, аніж без них. Вказаний ефект свідчить про те, що асфальтобетон марки АСГ.Др.Щ.А.НП.І виготовлений із додаванням 2,0 % мас. гумінових кислот за температури 120 °С є більш міцним за довготривалої дії води у порівнянні із асфальтобетоном, виготовленим на немодифікованому бітумі.

Таблиця 6

Фізико-механічні властивості асфальтобетонів марки АСГ.Др.Щ.А.НП.І

№ з/п	Назва показника	Значення показника для асфальтобетону з бітумом:	
		БНД 70/100	БНД 70/100 + 2,0 % мас. гумінових кислот
1	Середня густина, г/см ³	2,43	2,43
2	Водонасичення, % за об'ємом	0,5	0,5
3	Границя міцності при стиску, МПа, за температури: 20 °С 50 °С	3,1	3,4
		1,6	1,8
4	Коефіцієнт водостійкості за експрес-методом	0,77	0,87

4. Висновки

Наведені в роботі результати досліджень вказують на те, що гумінові кислоти сповільнюють процеси технологічного старіння бітуму. Зокрема, найбільш позитивний ефект спостерігається при додаванні 2,0 % мас. кислот і температури процесу 120 °С.

Використовуючи модифікований гуміновими кислотами бітум було приготовано асфальтобетонну суміш із одержанням кінцевого продукту – асфальтобетону, після чого було проведено аналіз його якості. В результаті досліджень було встановлено, що асфальтобетон марки АСГ.Др.Щ.А.НП.І, виготовлений із додаванням 2,0 % мас. гумінових кислот за температури 120 °С, володіє кращими характеристиками, в тому числі – вищою міцністю за довготривалої дії води у порівнянні із асфальтобетоном, виготовленим на немодифікованому бітумі.

Можна стверджувати, що введення гумінових кислот до бітуму позитивно впливає на його властивості, а також покращує характеристики одержаного асфальтобетону.

Бібліографічний список

1. **Pyshyev S.** Adhesive modifiers for bitumen obtained from coumarone-indene fractions of liquid coal coking products / **S. Pyshyev, Yu. Prysiazhnyi, Yu. Demchuk, G. I. Borbeyiyong, N. Vytrykush** // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2025. – Vol. 138. – P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103933>.

2. **Zhang J.** Performance assessment of composite modified bitumen integrated with desulfurized crumb rubber and SBS modifier as waterproofing adhesive layer / **Zhang J., Cao W., Li W., Lou Sh., Zhang W., Hou Z.** // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2024. – Vol. 134. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103802>.

3. **Hu T.** Mechanochemical preparation and performance evaluations of bitumen-used waste polypropylene modifiers / **Hu T., Luo Y., Zhu Y., Chu Y.,**

Hu G., Xu X. // *Case Studies in Construction Materials* – 2024. – Vol. 21. – P. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03471>.

4. **Nizamuddin S.** Recycled plastic as bitumen modifier: The role of recycled linear low-density polyethylene in the modification of physical, chemical and rheological properties of bitumen / **Nizamuddin S., Jamal M., Gravina R., Giustozzi F.** // *Journal of Cleaner Production* – 2020. – Vol. 266. – P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121988>.

5. **Jexembayeva A.** Preparation of polymer bitumen binder in the presence of a stabilizer / **Jexembayeva A., Konkanov M., Aruova L., Zhaksylykova L., Baidaulet Z.** // *Polymer Engineering & Science* – 2025. – Vol. 65. – P. 5-13. <https://doi.org/10.1002/pen.26986>.

6. **Xiao N.** Effects of organic nano calcium carbonate on aging resistance of bio-asphalt / **Xiao N., Zhang Y., Xia H., Lei Y., Luo Y.** // *Advances in Materials Science and Engineering* – 2022. – Vol. 2022. – P. 1-10. <http://dx.doi.org/10.1155/2022/6043030>.

7. **Feng L.** Study on the Properties of Graphene Oxide–Wood Tar-Based Composite Rejuvenated Asphalt / **Feng L., Zhou F., Li Y., Liu K., Zhu J., Gong G.** // *Coatings* – 2024. – Vol.14(9) – P. 1-21. <https://doi.org/10.3390/coatings14091081>.

8. **Zhou S.** Development of sustainable lignin-based coatings for layered double hydroxides: enhancing synergistic anti-aging properties in bitumen / **Zhou S., Long K., Zhang Z., Li S., Ai C., Yan, C.** // *Fuel* – 2025. – Vol. 380 – P. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133166>.

9. **Tan J.** An Investigation of the Effects of Thermo-Oxidative Aging and the Freeze–Thaw Cycle on the Performance of Polyester-Based, Self-Adhesive Asphalt Waterproofing Membranes / **Tan J., Zhang C., Sun G., Ma X., Du H.** // *Applied Sciences* – 2024. – Vol. 14(18) – P. 1-12. <http://dx.doi.org/10.3390/app14188237>.

10. **Gunka V.** A Review of Road Bitumen Modification Methods. Part 1–Physical Modification / **Gunka V., Astakhova O., Hrynychuk Y., Sidun I., Reutskyy V.,**

Mirchuk I., Poliak O. // *Chemistry and Chemical Technology* – 2024. – Vol. 18 – P. 295-304. <https://doi.org/10.23939/chcht18.02.295>.

11. Pyshyev S. Use of Lignite Processing Products as Additives to Road Petroleum Bitumen / **Pyshyev S., Miroshnichenko D., Chipko T., Donchenko M., Bogoyavlenska O., Lysenko L., Prysiazhnyi Y.** // *ChemEngineering* – 2024. – Vol. 8 (2) – P. 1-10. <https://doi.org/10.3390/chemengineering8020027>.

12. Arabani M. The influence of olive kernel ash obtained from canning factory as a bitumen modifier / **Arabani M., Hassanjani M. H.** // *Construction and Building Materials* – 2024. – Vol. 441 – P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137532>.

13. Su Y. Thermal oxidative aging mechanism of lignin modified bitumen / **Su Y., Tang S., Cai M., Nie Y., Hu B., Wu S., Cheng C.** // *Construction and Building Materials* – 2023. – Vol. 363. – P. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129863>.

14. Xu G. Rheological properties and anti-aging performance of bitumen binder modified with wood lignin / **Xu G., Wang H., Zhu H.** // *Construction and Building Materials* – 2017. – Vol. 151. – P. 801-808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.151>.

15. Bakshi P.S. Chitosan as an environment friendly biomaterial – a review on recent modifications and applications / **Bakshi P.S., Selvakumar D., Kadirvelu K., Kumar N.S.** // *International Journal of Biological Macromolecules* – 2020. – Vol. 150. – P. 1072-1083. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.113>.

16. Donchenko M. Influence of Potassium Humate on the Technological Aging Processes of Oxidized Petroleum Bitumen / **Donchenko, M. Grynysyn O., Demchuk Yu., Topilnytskyi P., Turba Yu.** // *Chemistry & Chemical Technology* – 2023. – Vol. 17. – P. 681-687. <https://doi.org/10.23939/chcht17.03.681>.

17. Grynysyn O. Investigation of petroleum bitumen resistance to aging / **Grynysyn O., Donchenko M., Khllybysyn Yu., Poliak O.** // *Chemistry & Chemical Technology* – 2021. – Vol. 15. – P. 438-442. <https://doi.org/10.23939/chcht15.03.438>.

18. Donchenko M. Investigation of resistance of modified bitumens to technological aging / **Donchenko M., Grynysyn O.** // *Chemistry, Technology and Application of Substances* – 2022. – Vol. 5. – P. 56-60. <https://doi.org/10.23939/ctas2022.01.056>.

19. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань : ДСТУ Б В.2.7-319:2016. – [Чинний від 2016-07-01]. – К.: Держстандарт України, 2016. – (Національний стандарт

України) / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65403.

20. ДСТУ EN 1426:2018 (EN 1426:2015, IDT) Бітум та бітумні в'язучі. Визначення глибини проникності голки (пенетрації). – [Чинний від 01.06.2019] / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78299.

21. ДСТУ EN 1427:2018 (EN 1427:2015, IDT) Бітум та бітумні в'язучі. Визначення температури розм'якшеності за методом кільця і кулі. – [Чинний від 01.06.2019] / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78301.

22. ДСТУ 8825:2019 Бітум та бітумні в'язучі. Метод визначення розтяжності. – [Чинний від 01.01.2020] / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82135.

23. ДСТУ 9169:2021 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення зчеплюваності з мінеральним матеріалом. Технічні умови. – [Чинний від 01.08.2022] / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=97049.

24. ДСТУ 8787:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Метод визначення зчеплюваності зі щебенем. – [Чинний від 01.06.2019] / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77885.

25. ДСТУ EN 12607-1:2015 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення опору до твердіння під впливом теплоти та повітря. Частина 1. Метод RTFOT. – [Чинний від 01.07.2016] / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63683.

26. ДСТУ EN 12607-2:2019 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення опору до твердіння під впливом тепла та повітря. Частина 2. Метод TFOT. – [Чинний від 01.01.2020] / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82365.

27. Ханик Я. М. Процеси та апарати хімічних технологій. Частина II. Гідромеханічні процеси. Перемішування. / **Ханик Я. М., Дубинін А.І., Станіславчук О.В., Білецька Л.З., Станіславчук О.П.** – Видавництво Львівської політехніки, 2006. – 180 с.

Рукопис надійшов до редакції 06.04.2025 р.

USE OF BROWN COAL PROCESSING PRODUCTS AS MODIFIERS FOR ROAD BITUMENS© Yu.V. Prysyzhnyi¹, M.I. Donchenko², T.A. Chipko³, M.V. Hryhorash⁴, S.V. Pyshyev⁵

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

¹ Prysyzhnyi Yuriy V., Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing (DCTOGP), e-mail: yurii.v.prysiashnyi@lpnu.ua² Donchenko Myroslava I., Ph.D., Assistant of DCTOGP, e-mail: KhTNH.dept@lpnu.ua³ Chipko Taras A., Postgraduate Student of DCTOGP, e-mail: KhTNH.dept@lpnu.ua⁴ Hryhorash Mykola V., student of the Department of Chemical Technology and Engineering, e-mail: KhTNH.dept@lpnu.ua⁵ Pyshyev Serhiy V., Doctor of Technical Sciences, Prof., Prof. of the DCTOGP, e-mail: serhii.v.pyshiev@lpnu.ua

The study investigated the use of brown coal humic acids as modifiers of road petroleum bitumens. After establishing the optimal dosage of humic acids (2.0 % by mass of raw material) and the duration of the mixing process (1 hour) in the preliminary stages of the research, further experiments were aimed at studying the effect of temperature on the modification process. For this purpose, studies were conducted at the following mixing temperatures: 120, 150 and 180 °C.

During these studies, it was found that the addition of humic acids to bitumen significantly improves its properties, such as resistance to technological ageing, which was carried out using the RTFOT method, compared to the change in properties after heating for the initial sample. In addition, the most positive effect was observed at a modification temperature of 120 °C. Meanwhile, increasing the temperature to 150 and 180 °C leads to a deterioration in the initial properties of the modified samples and is not advisable.

The next stage of research involved preparing an asphalt concrete mixture and testing the final coating – asphalt concrete. For comparison, asphalt concrete samples were prepared using BND 70/100 petroleum bitumen and bitumen modified under optimal conditions – with the addition of 2.0 % by mass of humic acids, a process duration of 1 hour and a temperature of 120 °C.

The results showed that asphalt concrete of the ACG.Dr.Sh.A.NP.I grade, manufactured using modified bitumen, is characterized by improved physical and mechanical properties. In particular, its increased strength under prolonged exposure to water was established, which is especially important for ensuring the durability of road surfaces in real operating conditions. Thus, the data obtained confirm the feasibility of using humic acids as affordable and environmentally safe modifiers to improve the quality of road bitumens and asphalt concretes.

Keywords: brown coal, humic acids, modifier, optimal dosage, road bitumen, asphalt concrete.

Corresponding author: Yu.V. Prysyzhnyi, e-mail: yurii.v.prysiashnyi@lpnu.ua

Manuscript received 2025/06/04

ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ КОКСОХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ У ВИРОБНИЦТВІ ШЛІФУВАЛЬНО-ПОЛІРУВАЛЬНИХ ПАСТ© М.О. Борисенко¹, І.В. Сінкевич²

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

¹ Максим Олексійович Борисенко, аспірант кафедри технології переробки нафти, газу та твердого палива (КТПНГТП), e-mail: borysenkoomax@gmail.com² Ірина Валеріївна Сінкевич, канд. техн. наук, доц., проф. КТПНГТП, e-mail: iyvaam@gmail.com

У статті представлено огляд щодо перспективності використання відходів та побічних продуктів процесу виробництва доменного коксу, у якості основних, зокрема абразивних, компонентів у складі шліфувально-полірувальних паст (ШПП). Визначено, що виробництво ШПП, що мають широку сферу застосування та користуються значним попитом, на базі відходів, має досить важливе значення для України, оскільки сприяє створенню та розвиненню циркуляційної економіки. Важливим аспектом в управлінні коксохімічним підприємством (КХП) виступає технічне забезпечення процесу виробництва доменного коксу. Основним функціональним елементом технічного забезпечення, разом з впровадженням нових технологій, автоматизацією та комп'ютеризацією технологічного процесу, виступає безперервне технічне обслуговування та ремонт заводського обладнання. Реалізація цього елементу відбувається, в тому числі, і за рахунок застосування ШПП при проведенні регламентних та аварійних ремонтних робіт. Серед напрямків застосування ШПП на КХП можна виділити наступні: обробка металевих поверхонь; полірування лакофарбових покриттів; чистка та обробка деталей устаткування; полірування поверхні деталей; усунення дефектів виробничих матеріалів; використання у лабораторних і наукових дослідженнях. Обґрунтовано, що серед номенклатури відходів, що утворюються в процесах коксування кам'яного вугілля, в якості абразивних компонентів ШПП можна розглядати наступні: вугільний та коксовий пил; коксові шлаки; побічні продукти газоочищення; коксові пічні відкладення. Натомість побічні продукти хімічних процесів (феноли, аміак та їх похідні) можуть використовуватися в складі ШПП, особливо в контексті синтезу терморезистивних смол або для корекції рН та в'язкості паст з метою досягнення бажаних характеристик для шліфування-полірування різних видів поверхонь.

Ключові слова: пасти, шліфування-полірування, абразивний компонент, поверхня, відходи, побічні продукти, вугільний пил, коксовий пил, коксовий шлак.

Автор для листування І.В. Сінкевич, e-mail: ivsaaam@gmail.com

Шліфувально-полірувальні пасти (ШПП) відносяться до ряду основних матеріалів, що досить часто використовуються для обробки металевих або лакофарбових поверхонь. Пасти застосовуються для покращення вигляду поверхні, усунення дефектів або створення глянцевого покриття на різних матеріалах. Виробництво ШПП в Україні відноситься до найперспективніших галузей промисловості, що зумовлено наявністю певних ресурсів, розвинутої промислової інфраструктури та високого попиту на абразивні матеріали у різних галузях промисловості, зумовлених необхідністю проведення ремонтних та відновлюваних робіт, пов'язаних з веденням бойових дій. Сучасні тенденції розвитку промисловості України передбачають залучення до технологій виробництва товарної продукції різних видів відходів, що накопичені та постійно утворюються на промислових об'єктах [1], зокрема на коксохімічних підприємствах (КХП). Розглядаючи промислові відходи як цінну вторинну сировину [2], можна забезпечити розширення обсягів виробництва ШПП, що дозволить сприяти розвитку цього сектору промисловості, створити нові робочі місця, зменшити кількість небезпечних промислових відходів, а також забезпечити Україну високоякісними абразивними матеріалами для внутрішнього та міжнародного ринків.

Забезпечення процесу виробництва доменного коксу – це комплекс заходів, які гарантують безперебійне функціонування виробничого процесу, стабільність роботи обладнання, ефективне використання ресурсів та досягнення бажаних результатів на всіх етапах виробництва. Це важливий аспект в управлінні КХП, який охоплює певні складові, представлені у вигляді структурної схеми (див. рис. 1).

Матеріально-технічне забезпечення процесу виробництва доменного коксу на КХП передбачає наявність необхідних ресурсів, сировини, матеріалів, інструментів і комплектуючих, які забезпечують безперервність виробничого процесу. Воно включає в себе: постачання сировини; управління запасами; планування закупівель; логістика та складування.

Технічне забезпечення включає в себе забезпечення необхідними технічними та технологічними засобами для виконання робіт із: постійного обслуговування та ремонту обладнання; впровадження нових технологій; автоматизації та комп'ютеризації технологічного процесу.

Енергетичне забезпечення – це, насамперед, забезпечення процесу виробництва доменного коксу необхідною енергією (електричною та тепловою). Цей вид забезпечення охоплює: підключення до стабільних джерел енергопостачання; проведення енергетичного аудиту; оптимізація витрат енергоресурсів; використання відновлюваних джерел енергії.

Забезпечення якості полягає в підтримці високого рівня якості на всіх етапах виробництва, що досягається за рахунок: контролю якості сировини та готової продукції; вдосконалення технології виробництва; впровадження систем менеджменту якості.

Екологічне забезпечення – це управління виробничими процесами таким чином, щоб мінімізувати вплив на навколишнє середовище. Для цього необхідно: використовувати екологічно чисті технології; створити систему управління відходами та їх утилізації; дотримуватися екологічних стандартів і норм.

Саме в контексті технічного забезпечення процесу виробництва доменного коксу треба розглядати застосування ШПП в умовах КХП. Так, напрямки застосування ШПП на КХП можна представити у вигляді структурної схеми (див. рис. 2), що ілюструє їх виняткове значення при виконанні регламентних та аварійних ремонтних робіт.

Доцільно детальніше розглянути кожен напрямок застосування ШПП на КХП та їх вплив на технологічний процес виробництва доменного коксу.



Обробка металевих поверхонь. В технологічному процесі виробництва доменного коксу на КХП задіяно багато різних металевих конструкцій та обладнання, що потребують обробки своєї поверхні. До них відносяться частини трубопроводів, резервуарів, фітінгів та іншого обладнання, що контактує з високими температурами та агресивними хімічними середовищами [3]. При проведенні ремонтних робіт ШПП дозволяє видаляти оксидні шари і готувати металеву поверхню до нанесення покриття [4].

Полірування лакофарбових покриттів. При використанні лаків та інших покриттів для обробки зовнішніх або внутрішніх поверхонь труб або механізмів ШПП дозволяє видаляти подряпини на покриттях (реставрація покриттів після використання або через механічні пошкодження), тим самим додаючи блиск і рівномірність нанесення покриттів [5], що зменшує їх схильність до зношування.

Чистка та обробка деталей устаткування. На КХП часто виникає потреба в чистці обладнання, яке працює в агресивних середовищах. При цьому застосування ШПП дозволяє зменшувати знос устаткування, забезпечуючи плавність роботи механізмів, зменшуючи тертя між рухомими частинами. Також ШПП дозволяють видаляти застарілі забруднення та накопичення матеріалів [6], що утворюються в процесах коксування, хімічних реакціях чи при спалюванні.

Полірування поверхні деталей досить часто використовується для підвищення ефективності обміну тепла у різних теплових апаратах. Полірування поверхонь передачі тепла в таких апаратах може допомогти покращити теплопередачу (після полірування поверхня стає більш гладкою, що підвищує ефективність передачі тепла) [7, 8]; запобігти накопиченню відкладень (гла-

дка поверхня зменшує ймовірність утворення відкладень, котрі можуть перешкоджати нормальному теплообміну) [9, 10].

Усунення дефектів виробничих матеріалів. ШПП можуть застосовуватися для обробки матеріалів (з'єднувальні та ущільнюючі матеріали тощо), для усунення дефектів на поверхні [11], що сприяє підвищенню їх якості та експлуатаційної надійності.

Використання у лабораторних і наукових дослідженнях ШПП дозволяє отримувати зразки з рівною та полірованою поверхнею, що використовуються в дослідженнях властивостей матеріалів (наприклад, для тестування мікроструктури або хімічних характеристик); підготовлювати зразки для подальших досліджень, забезпечуючи кращу точність результатів [12, 13].

Таким чином, використання ШПП при проведенні профілактичних, ремонтних або монтувальних робіт в умовах КХП сприяє продовженню терміну служби устаткування (наприклад, у цехах вловлювання хімічних продуктів) та підвищенню ефективності його використання, а також підвищенню якості продукції. Основним напрямком розвитку промисловості України, зокрема її коксохімічної галузі, виступає формування та впровадження принципу безвідходності виробництва. Під безвідходністю виробництва у сучасних умовах розвитку виробничих процесів можна розуміти підхід, спрямований не тільки на повне усунення відходів, але і на мінімізацію їх обсягів [14, 15]. Безвідходне виробництво представляє собою шлях до сталого розвитку, який дозволяє знижувати негативний вплив на навколишнє середовище, економити ресурси та підвищувати ефективність виробництва.

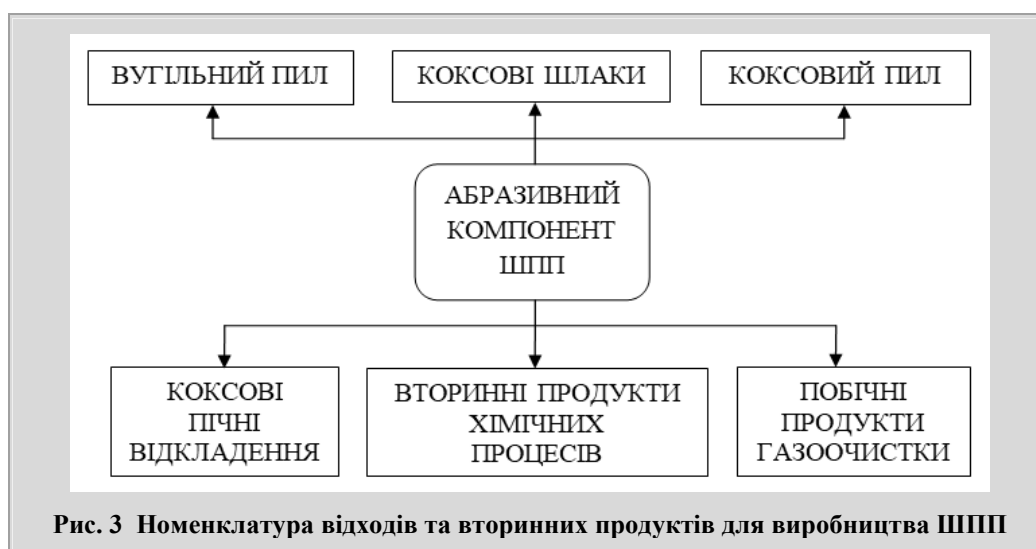


Рис. 3 Номенклатура відходів та вторинних продуктів для виробництва ШПП

Одним з напрямків впровадження безвідходності у технологічний процес виробництва доменного коксу, разом з використанням відходів і побічних продуктів безпосередньо при підготовці шихти до коксування [16, 17], може слугувати й використання різноманітних відходів (наприклад, в якості абразивного компоненту) при виготовленні ШПП.

Номенклатура відходів, що утворюються в процесах коксування кам'яного вугілля, які можуть бути використані в якості абразивного компоненту при виробництві ШПП, представлена в вигляді структурної схеми (див. рис. 3).

Вугільний пил. Вугільний пил утворюється при транспортуванні і складанні [18], а також при подрібненні вугілля для складання шихти коксування [19]. На етапі транспортування і складування вугілля пил може утворюватися через механічні впливи, коли великі шматки вугілля стикаються між собою або з іншими поверхнями. Оцінки показують, що до 5 % загальної маси вугілля може перетворюватися на пил при неконтрольованому транспортуванні та зберіганні [20]. Значно більша кількість (понад 10 % загальної маси вугілля) вугільного пилу утворюється на етапах його подрібнення, особливо при виникненні явища переподрібнення. Це явище, разом зі збільшенням пилоутворення, призводить до перевитрат енергії, підвищеного зносу робочих елементів дробарок, зменшення їх продуктивності та якості отриманого коксу [21].

Розмір часток вугільного пилу може варіюватися в залежності від джерела його утворення, але зазвичай знаходиться в межах діапазону від 10 мкм до 100 мкм [22]. Відомо, що вугільний пил володіє абразивністю, яка зумовлює при його транспортуванні через труби, механізми або в процесі очищення повітря за допомогою фільтрів, значний знос обладнання. Вугільний пил, як і вугілля з якого він утворюється, характеризується невисоким значенням твердості, зазвичай в залежності від марки вугілля, твердість знаходиться в межах від 1,75 до 3 за шкалою Мооса. Так, наприклад, довгополум'яне (Д) вугілля має твердість на рівні 2,0 од.; жирне (Ж) – 2,50-2,75 од.; коксівне (К) – 1,75-2,0 од.; пісне (П) і напівантрацит (НА) – 2,50-3,0 од. [23].

Незважаючи на не високе значення твердості, вугілля та його пил мають певну абразивність, яка зумовлена, у більшому ступені, властивостями вуглецю (75,0-92,0 %), в меншому – наявністю мінеральних домішок [23]. Основними мінеральними домішками у вугіллі є: гіпс ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$), твердість 1,5-2,0 од.; каолінові мінерали ($\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$), твердість 2,0-2,5 од.; кальцит (CaCO_3), твердість близько 2,75-3,50 од.; прохлорит ($2\text{FeO} \times 2\text{MgO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$), твердість 1,5-3,0 од.; мусковіт ($\text{KNaO} \times 2\text{Al}_2\text{O}_3 \times 6\text{SiO}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$), твердість 2,0-3,0 од.; сидерит (FeCO_3), твердість 3,0-5,0 од.; лимоніт ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$), твердість 3,50-5,50 од.; пірит

(сірчаний або залізний колчедан, FeS_2), твердість 6,0-6,5 од.; магнетит (Fe_3O_4), твердість 6,0-6,5 од.; кварц (SiO_2), твердість 7,0-7,25 од.; оксиди різних металів, що мають високу твердість, але містяться в дрібнодисперсному стані [23]. За винятком каолінових мінералів, прохлориту і кальциту, всі перераховані мінеральні включення мають відносно високу твердість і здатні при великому вмісті їх у вугільному пилу створити абразивне середовище.

Таким чином, абразивні властивості вугілля, що визначаються за твердістю вугільної речовини та мінеральних включень (з урахуванням їх відсоткового вмісту), можуть коливатися в широких межах. Представлені вище данні підтверджують той факт, що абразивність вугілля та вугільного пилу різних родовищ може змінюватися у досить широких межах – головним чином, залежно від вмісту вуглецю і твердих мінеральних частинок.

Отже, з огляду на невисоку твердість, вугільний пил може використовуватися для виготовлення виключно м'яких полірувальних паст, які підходять для обробки чутливих поверхонь, особливо коли необхідно уникнути пошкоджень або зберегти цілісність оброблюваного матеріалу.

Коксовий пил. Вторинним продуктом процесу виробництва доменного коксу, який внаслідок своїх абразивних властивостей може використовуватися для виробництва ШПП є коксовий пил, який утворюється при фізичному руйнуванні коксу під час його вигрузки з печі у вагон, підчас гасіння або при подальшому навантаженні/розвантаженні [24]. Обсяги утворення коксового пилу можуть коливатися від 1,0 % до 5,0 % від загальної маси коксу в залежності від умов виробництва.

Серед основних причин утворення коксового пилу можна виділити наступні:

1) Утворення пористого тіла коксу під час процесу коксування. Пористість коксу за звичайних умов його виготовлення коливається від 49,3 % до 52,7 % [25]. Розрізняють мікропори (дрібні пори з діаметром до 2 нм, які забезпечують високу здатність до абсорбції газів та пари), мезопори (середні за розміром пори, діаметр яких становить від 2 до 50 нм, вони часто впливають на хімічну активність коксу), макропори (великі пори, діаметром 50-500 нм, які важливі для забезпечення хорошого газообміну під час горіння) [26, 27].

При коксуванні вугільної шихти відбувається перетворення вугілля, яке супроводжується створенням високого внутрішнього тиску газу в коксовому пірозі з подальшим видаленням летких речовин. Саме ці процеси суттєво впливають на формування мережі пор та їх розмір [28, 29].

2) Температурні коливання, що виникають у процесі коксування, коли температура в коксовій печі коливається або є різниця в швидкості нагріву, виникають

термічні напруги [30], що можуть призвести до утворення тріщин у готовому коксі. Ці тріщини в подальшому можуть привести до утворення пилу.

3) Занадто швидке охолодження, наприклад, під час гасіння коксу, також впливає на його руйнування і утворення дрібних класів [31]. Недотримання температурного режиму охолодження може також сприяти утворенню коксового пилу.

4) Вихідні властивості вугілля, зокрема його спікливість та спікаюча здатність. Вугілля з високою спікливістю та високою спікаючою здатністю формує кокс з хорошими механічними властивостями та стійкістю до руйнування [32]. Це важливо для доменних процесів, оскільки кокс має забезпечувати необхідний газообмін і мати високу механічну міцність при високих температурах. Низька спікливість і спікаюча здатність можуть призвести до утворення коксу, який швидко руйнується під механічним навантаженням, утворюючи пил [33].

5) Порушення у технологічному процесі виробництва. Якщо процес коксування не є рівномірним, можуть утворюватися температурні неоднорідності, що призводить до нерівномірного спікання коксу [34], і як наслідок, утворення пилу. Печі зі старою вогнетривкою кладкою можуть призводити до неефективного коксування вугілля [35], що збільшує імовірність утворення дрібних класів коксу та пилу (в наслідку недогріву коксового пирога).

Розмір коксового пилу безпосередньо залежить від процесів коксування, а також від механічних впливів під час транспортування та обробки коксу. Пил складається з дуже дрібних часток, які можуть мати різний діаметр. Частки коксового пилу зазвичай мають діаметр від 0,1 до 1 мм, хоча в деяких випадках можуть бути ще дрібнішими (менше 0,1 мм) [36]. Часто розмір часток коксового пилу класифікується наступним чином: грубий пил (частки розміром більше 1 мм); середній пил (частки від 0,5 до 1мм); тонкий пил (частки розміром менше 0,5 мм) [37].

Твердість коксу та коксового пилу оцінюють за методом Я.Е. Гінсбурга за його абразивною здатністю, яку визначають по втраті ваги алюмінієвого диска, що обертається зі швидкістю 30 об/хв., притиснутого до наважки коксу крупністю менше 0,5 мм під тиском 0,24 МН/м². Показник твердості знаходиться в межах 70-140 мг [38]. Завдяки цьому показнику коксового пилу можна використовувати його при виробництві ШПП для обробки різних металевих поверхонь (сталь, алюміній, мідь або бронза), ефективно знімаючи поверхневі шари матеріалу і вирівнюючи дефекти. ШПП на базі коксового пилу є специфічним видом паст, який можна досить ефективно використовувати як для грубої обробки металевих поверхонь, так і для декоративної поліровки (отримання глянцевої поверхні) лакофарбових покриттів.

Коксові шлаки. Коксові шлаки – це відходи, що утворюються під час процесу коксування вугілля в печах. Вони складаються в основному з мінеральних залишків, які не перетворюються на кокс в результаті коксування вугілля. Основними компонентами коксових шлаків є: оксиди металів (CaO, MgO, FeO, Al₂O₃ та ін.); силікати (SiO₂); карбооксиди (CaCO₃, MgCO₃); сульфати; фосфати, а також мікроелементи [39, 40]. Всі ці компоненти утворюються, коли вугілля піддається високим температурам в коксових печах. Після цього вони залишаються у вигляді шлаків і можуть бути видалені з коксової печі за допомогою спеціальних пристроїв. У процесі коксування з кожної тонни вугільної шихти може утворюватися приблизно до 50-70 кг коксових шлаків. Це залежить від складу вугілля, зокрема його зольності [41]. Слід зазначити, що хоча коксові шлаки ніколи не використовувалися безпосередньо для шліфування і полірування, їх можна додавати до ШПП як наповнювач або як додатковий абразивний компонент для підвищення ефективності паст.

Побічні продукти газоочистки. На коксохімічних підприємствах утворюються тверді відходи очистки коксового газу в циклонах, електрофільтрах, мокрих скруберах, такі як різноманітні пилові частки та хімічні осадки (пил, що містить сірчисті сполуки, оксиди металів та інші неорганічні елементи).

Пил, що містить мінеральні залишки сірки та її сполук (наприклад, сульфати кальцію та інших металів), утворюється під час очищення газів від сірчистого водню (H₂S) і сірчистих оксидів [42, 43]. Таким чином, завдяки своєму складу тверді побічні продукти газоочистки можуть бути додані до складу ШПП у якості допоміжного абразивного матеріалу.

Коксові пічні відкладення. Коксові пічні відкладення (піровуглець) утворюються на стінках коксових печей в процесі коксування вугілля в наслідок хімічних реакцій, що відбуваються під час процесу коксування. Відкладення можуть містити різні хімічні сполуки, що утворюються в результаті випаровування, конденсації та осадження компонентів коксових газів, а також реакцій між компонентами вугілля і металами, що використовуються в печах [44, 45].

Основними складовими коксових пічних відкладень виступають: тверді вуглецеві відкладення [46]; сульфати (наприклад, сульфат кальцію, сульфат магнію) та сірчисті сполуки, що можуть утворюватися внаслідок реакцій з металами в печах або після охолодження коксових газів; оксиди (CaO, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃) та інші мінеральні компоненти, що містяться у складі вугілля; пірити (FeS₂) та інші сульфіди металів.

Серед чинників, які впливають на склад пічних відкладень, виділяють наступні [47]: тип вугілля (різний вміст сірки, мінералів, металів і органічних сполук); температура процесу (висока температура в коксових печах може призводити до більш інтенсивного випаро-

вування летких органічних сполук, що впливає на склад відкладень); недовантаження печей (хворі печі), що зменшує рівень завантаження (завантаження на 2 або 2,5 бункера), а отже призводить до збільшення температури підсклепового простору до перегріву з 750 до 950 °С і вище; помел шихти (вміст дрібних класів), пил летить у газозбірник і моментально піддається процесу піролізу.

Зазвичай, утворення відкладень в коксових печах може становити близько 1,0 % від маси вугілля, що переробляється. Завдяки своєму компонентному складу вони можуть бути використані як абразив для виготовлення ШПП або як добавку до інших абразивних матеріалів.

Вторинні продукти хімічних процесів. Під час коксування вугільної шихти, разом з коксом також отримують хімічні побічні продукти коксування, такі як феноли, аміак та інші органічні сполуки [48]. Похідні фенолу та аміаку в невеликих кількостях (до 0,1 %) можуть використовуватися в складі ШПП, особливо в контексті синтезу термореактивних смол або для корекції рН та в'язкості паст задля досягнення бажаних характеристик для шліфування-полірування. Однак їх застосування повинно бути добре контрольоване через потенційні токсичні властивості та можливу шкоду для здоров'я людини і навколишнього середовища. Тому важливо враховувати заходи безпеки та екологічні норми під час виготовлення і використання таких паст, що можуть містити суміші фенолів і інших компонентів (абразивних часток, олів, стабілізуючих речовин тощо).

Таким чином, відходи та побічні продукти виробництва доменного коксу можна розглядати в якості перспективних компонентів у виробництві ШПП різного функціонального призначення або для покращення характеристик товарних продуктів, що дозволяє підвищити ефективність шліфування та полірування поверхонь при їх використанні. Застосовуючи відходи та побічні продукти коксування у виробництві ШПП, можливо суттєво знизити витрати на їх виробництво та негативний вплив на навколишнє середовище за рахунок підвищення ефективності використання відходів та побічних продуктів коксохімічного виробництва.

Висновки

Встановлено, що на коксохімічних підприємствах утворюється значна кількість відходів та вторинних продуктів, які мають потенціал для повторного використання. Переробка відходів і вторинних продуктів на коксохімічних підприємствах не лише зменшує негативний вплив на навколишнє середовище, але й дозволяє підприємствам зменшувати витрати, покращуючи енергоефективність і використовуючи відходи як вторинну сировину для виробництва різних товарних продуктів, зокрема шліфувально-полірувальних паст (ШПП).

Для останнього з зазначених напрямків застосування серед відходів коксохімічного виробництва найперспективнішими слід вважати вугільний та коксовий пил, коксові шлаки, оскільки ці матеріали мають абразивні властивості внаслідок своєї твердості, яка за шкалою Мооса знаходиться в межах від 1 до 4 од.

Побічні продукти хімічних процесів, такі як феноли, аміак та інші органічні сполуки можуть використовуватися в складі ШПП головним чином для корекції величини рН та в'язкості паст для досягнення бажаних характеристик для шліфування-полірування поверхонь, але це, у свою чергу, потребує додаткових досліджень.

Таким чином, відходи та вторинні продукти процесу коксування вугільної шихти можуть ефективно застосовуватися не тільки в якості добавок до вугільної шихти та компонентів пило-вугільного палива, а і як один з основних компонентів витратного матеріалу, що має широкий спектр застосування при проведенні регламентних та аварійно-відновлювальних робіт в умовах КХП для забезпечення безперервності виробництва доменного коксу.

Використання відходів та побічних продуктів процесу виробництва доменного коксу при виготовленні ШПП слід розглядати лише як ще один важливий крок на шляху до створення глобальної системи безвідходного виробництва.

Бібліографічний список

1. **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.
2. *Закон України «Про управління відходами» (Відомості Верховної Ради, 2023, № 17, ст.75). Із змінами і доповненнями, внесеними Законом України № 4017-IX від 10.10.2024 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>*
3. **Остапенко М.А.** *Технологічне обладнання хімічних цехів коксохімічних заводів / М.А. Остапенко*. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – 166 с.
4. **Білик І.І.** *Технологія нанесення покриттів та їх властивості / І.І. Білик, С.О. Руденький*. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 120 с.
5. **Дмитрієв Д.О.** *Технологічне забезпечення контурного полірування при відновленні лакофарбових покриттів складних поверхонь / Д.О. Дмитрієв, С.О. Чурсов, В.С. Осадчук, С.А. Русанов // Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2023. – №1 (7). – С. 74-81. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.1\(7\).09](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.1(7).09).
6. **Wayne Crosbie.** *Clean and maintain industrial work area and equipment D1.ННК.CL3.07. Trainee Manual / Wayne Crosbie. Association of Southeast Asian Nations (ASEAN), 2012. – 110 p.*

7. **Kaixin Yan**. Influence of polishing process on surface morphology and thermo-hydraulic performance of additively manufactured Gyroid-structured heat exchanger / **Kaixin Yan, Hongwu Deng, Yewei Xiao, Junwei Wang, Yaoyuan Luo, Jiaqi Yan**. // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 253. – P. 123828. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123828>.
8. **Yuxin You**. Effect of Surface Microstructure on the Heat Dissipation Performance of Heat Sinks Used in Electronic Devices / **Yuxin You, Beibei Zhang, Sulian Tao, Zihui Liang, Biao Tang, Rui Zhou, Dong Yuan** // *Micromachines*. – 2021. – Vol. 12(3). – P. 265. <https://doi.org/10.3390/mi12030265>.
9. **Kukulka P**. Evaluation of Surface Roughness on the Fouling of Surfaces / **P. Kukulka, D. Kukulka, M. Devgun** // *Engineering, Chemistry, Environmental Science*. – 2007. – Vol. 12. – P. 537-542. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:136061769>.
10. **Burmester D**. Effects of surface roughness on wax deposition // **D. Burmester, A. Kainer, Yi. Lu** // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 231 (Part A). – P. 212383. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212383>.
11. **Sanchez L.E.A**. Surface finishing of flat pieces when submitted to lapping kinematics on abrasive disc dressed under several overlap factors / **L.E.A. Sanchez, N.Z.X. Jun, A.A. Fiocchi** // *Precision Engineering*. – 2011. – Vol. 35(2). – P. 355-363. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.09.012>.
12. **Kus J**. Coal weathering and laboratory (artificial) coal oxidation / **J. Kus, M. Misz-Kennan** // *International Journal of Coal Geology*. – 2017. Vol. 171. – P. 12-36. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.11.016>.
13. **Ghosh B**. Influence of coke structure on coke quality using image analysis method // **B. Ghosh, B.K. Sahoo, B. Chakraborty, K.K. Manjhi, S.K. Das, J.N. Sahu, K. Varma Atul** // *International Journal of Coal Science & Technology*. – 2018. – Vol. 5. – P. 473-485.
14. **Almansour M**. Towards Zero Waste: An In-Depth Analysis of National Policies, Strategies, and Case Studies in Waste Minimisation / **M. Almansour, M. Akrami** // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16(22). – P. 10105. <https://doi.org/10.3390/su162210105>.
15. **Abhishek Kumar Awasthi**. Zero waste approach towards a sustainable waste management / **Abhishek Kumar Awasthi, V.R. Sankar Cheela, Idiano D'Adamo, Eleni Iacovidou, M. Rafizul Islam, Michael Johnson, T. Reed Miller, Keshav Parajuly, A. Parchomenko, Loganath Radhakrishan, Min Zhao, Caili Zhang, Jinhui Li** // *Resources, Environment and Sustainability*. – 2021. – Vol. 3. – P. 100014. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100014>.
16. **Ярошевський С.Л.** Ресурсозберігаючі технології металургійного виробництва на основі використання українського вугілля / **С.Л. Ярошевський, А.В. Ємченко, І.В. Шульга [та інші]**. – Харків: Контраст, 2012. – 204 с.
17. **Сагалай Д.В.** Раціональне використання коксового дріб'язку / **Д.В. Сагалай, Д.В. Мірошниченко, І.В. Сінкевич**. – Харків: НТУ «ХПІ», 2024. – 154 с.
18. **Gorobei M**. Man-made pollution of the environment with coal dust as a result of operation and closure of coal mines / **M. Gorobei, V. Yermakov, O. Lunova** // *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. – 2020. – Vol. 29(4). – P. 693-700. <https://doi.org/10.15421/112062>.
19. **Кропивний В.М.** Технологія основних виробництв / **В.М. Кропивний, А.В. Кропивна, Л.А. Молокост, М.В.Босий, О.В. Кузик** – Кропивницький : Видавництво ТОВ «КОД», 2021. – 196 с.
20. **Yong Cao**. Recent progress and perspectives on coal dust sources, transport, hazards, and controls in underground mines // **Yong Cao, Yang Xiao, Zhen-Ping Wang, Qing-Wei Li, Chi-Min Shu, Xing-Rui Jiang, Shi-Liang Wu** // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2024. – Vol. 187, 159-194. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.095>.
21. **Смирнов В.О.** Технологія збагачення вугілля / **В.О. Смирнов, П.В. Сергєєв, В.С. Білецький**. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2011. – 476 с.
22. **Bei Li**. Effects of particle size on the self-ignition behaviour of a coal dust layer on a hot plate / **Bei Li, Mengjia Li, Wei Gao, Mingshu Bi, Li Ma, Qihua Qin, Chi-Min Shu** // *Fuel*. – 2020. – Vol. 260. – P. 116269. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116269>.
23. **Светкіна О.Ю.** Основи технічного аналізу вугілля / **О.Ю. Светкіна, О.Б. Нетяга, Г.В. Тарасова, С.М. Лисицька**. – Донецьк: НГУ, 2016. – 109 с.
24. **Проскура І.В.** Принципово нове в методах очистки повітря від пилу в процесах видобування коксу з камер коксових батарей / **І.В. Проскура** // *Східно-європейський журнал передових технологій*. – 2009. – № 4/9 (40). – С. 12-15.
25. **Чирка Т.В.** Фізичні властивості вуглецевих сипучих матеріалів / **Т.В. Чирка, Г.М. Васильченко, Е.Н. Панов [та інші]**. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 152 с.
26. **Zhongjie Hu**. The Influence of the Porous Structure of Activated Coke for the Treatment of Gases from Coal Combustion on Its Mechanical Strength / **Zhongjie Hu, Heng Zhou, Weili Zhang, Shengli Wu** // *Processes*. – 2020. – Vol. 8(8). – P. 900. <https://doi.org/10.3390/pr8080900>.
27. **Hidekazu Fujimoto**. Effect of Pore Structure of Coke on CO₂ Reactivity and Abrasion of Coke / **Hidekazu Fujimoto, Shozo Itagaki, Izumi Shimoyama, Kiyoshi Fukuda** // *Tetsu-to-Hagane*. – 2003. – Vol. 89(12). – P. 1198-1204. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.1955.89.12_1198.
28. **Duffy J.J**. Understanding the mechanisms behind coking pressure: Relationship to pore structure / **J.J.**

- Duffy, M. Panalytical, M. Castro Diaz, E. Snape Colin, K.M. Steel // *Fuel*. – 2007. – Vol. 86(14). – P. 2167-2178. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.03.040>.
29. Uduak P. Eyibio. The influence of force and inertinite on pore development in coke and its implications on coke strength / Uduak P. Eyibio, Hammad Aziz, Karen M. Steel // *Fuel*. – 2025. – Vol. 381(Part B). – P. 133444. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133444>.
30. Kosyrczyk L. Optimization of Thermal Parameters of the Coke Oven Battery by Modified Methodology of Temperature Measurement in Heating Flues as the Management Tool in the Cokemaking Industry / L. Kosyrczyk, S. Stelmach, K. Gaska, A. Generowicz / Chapter In book: *Advances in Energy Research: 2nd Edition*, 2023. <https://doi.org/10.37247/ADERES2EDN.2.2021.25>.
31. Pyshyev S. Modeling of Coke Distribution in a Dry Quenching Zone / S. Pyshyev, Ye. Zbykovskyy, I. Shvets, D. Miroshnichenko, S. Kravchenko, S. Stelmachenko, Yu. Demchuk, N. Vytrykush // *ACS Omega*. – 2023. – Vol. 8, - P. 19464–19473. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00747>.
32. Kardas E. Quality of coke used in blast furnace process – analysis of selected parameters / E. Kardas, P. Pustějovská // *Conference Quality Production Improvement*. – 2019. – Vol. 1(1). – P. 602-609. <https://doi.org/10.2478/cqi-2019-0081>.
33. Lundgren M. Blast Furnace Coke Properties and the Influence on Off-gas Dust / L. Maria / Licentiate Thesis. Luleå University of Technology. Luleå. Sweden, 2010. – 67 p.
34. Шульга І.В. Основи технології коксування вугілля : навч. посібник / І.В. Шульга, Д.В. Мірошніченко, О.В. Богоявленська. – Харків – Тернопіль: Крок, 2022. – 128 с.
35. Guozhang Jiang. Intelligent control of coke oven / Guozhang Jiang, Tingting He, Gongfa Li, Jianyi Kong // *International Journal of Computational Intelligence Systems. International Conference: Logistics Systems and Intelligent Management*. – 2014. – Vol. 1. – P. 1-7. <https://doi.org/10.1109/IJCSIM.2010.5461371>.
36. Лазаренко Т.В. Шляхи удосконалення технології і обладнання для виробництва коксу з потрібними властивостями / Т.В. Лазаренко, О.Я. Карпенко, В.В. Лазаренко // *Вуглехімічний журнал*. – 2008. – № 1–2. – С. 39–49.
37. Довідник коксохіміка. Том 2. Виробництво коксу. – Харків: ВД «ІНЖЕК», 2014. – 728 с.
38. Кузніченко В.М. Твердість коксу: вибір методу визначення/В.М. Кузніченко, С.С. Кубрак // *Вуглехімічний журнал*. – 2016. – №1. – С. 3-6.
39. Marc A. Duchesne. Flow behaviour of slags from coal and petroleum coke blends / Marc A. Duchesne, Alexander Y. Ilyushechkin, Robin W. Hughes, Dennis Y. Lu, David J. McCalden, Arturo Macchi, Edward J. Anthony // *Fuel*. – 2012. – Vol. 97. – P. 321-328. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.019>.
40. Teasdale S.L. Observations of the Reduction of FeO from Slag by Graphite, Coke and Coal Char / S.L. Teasdale, P.C. Hayes // *ISIJ International*. – 2005. – Vol. 45(5). – P. 634-641. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.634>.
41. Van Dyk J.C. Coal and coal ash characteristics to understand mineral transformations and slag formation / J.C. Van Dyk, S.A. Benson, M.L. Laumb, F.B. Waanders // *Fuel*. – 2009. – Vol. 88(6). – P. 1057-1063. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.11.034>.
42. Пат. 80134 Україна. B01D 53/14. Спосіб очищення газів від сірководню. Яворський В.Т., Калимон Я.А., Слюзар А.В. (Україна). №20041210478 від 20.12.2004 р. *Опыл.* 27.08.2007. *Бюл.* №13
43. Lucas de Oliveira Carneiro. Separation and Purification Technology Improving H₂S removal in the coke oven gas purification process / Lucas de Oliveira Carneiro, Suênia Fernandes de Vasconcelo, Gilvan Wanderley de Farias Neto, Romildo Pereira Brito, Karoline Dantas Brito // *Separation and Purification Technology*. – 2021. – Vol. 257. – P. 117862. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117862>.
44. Zymła V.(2007). Coke Oven Carbon Deposits Growth and Their Burning Off / V. Zymła, F. Honnart // *ISIJ International*. – 2007. – Vol. 47(10). – P. 1422-1431. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.47.1422>.
45. Yaqiang Yuan. Investigation on formation and combustion process of carbon deposits from coke oven riser during waste heat recovery / Yaqiang Yuan, Tao Rong, Huafang Yu, Hao Guo, Yan Gao, Jingsong Wang, Qingguo Xue, Haibin Zuo // *Fuel*. – 2024. – Vol. 373. – P. 132311. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132311>.
46. Шмалько В.М. Фрактальні властивості вуглецевих відкладень із коксової камери / В.М. Шмалько, О.І. Зеленський, А.М. Брагинський // *Хімія, фізика та технологія поверхні*. – 2014. – Т. 5. – № 2. – С. 152-157.
47. Hao Wang. Formation and Evolution Mechanism for Carbonaceous Deposits on the Surface of a Coking Chamber / Hao Wang, Baosheng Jin, Xiaojia Wang, Gang Tang // *Processes*. – 2019. – Vol. 7(8). – P. 508. <https://doi.org/10.3390/pr7080508>.
48. Довідник коксохіміка. Том 3. Уловлювання та переробка хімічних продуктів коксування. – Харків: ВД «ІНЖЕК», 2009. – 432 с.

Рукопис надійшов до редакції 20.02.2025 р.

USE OF COKE CHEMICAL ENTERPRISE WASTE IN THE PRODUCTION OF GRINDING AND POLISHING PASTES© M.O. Borysenko¹, I.V. Sinkevich²

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine (NTU "KhPI")

¹Borysenko Maksym Oleksiyovych, Postgraduate Student, Department of Oil, Gas and Solid Fuel Processing Technologies (DOGSFPT), e-mail: borysenkoomax@gmail.com

²Sinkevych Iryna Valeriivna, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of DOGSFPT, e-mail: iysaam@gmail.com

The article provides an overview of the prospects for using waste and by-products of the blast furnace coke production process as basic, in particular abrasive, components in grinding and polishing pastes (GPP). It has been determined that the production of GPP, which has a wide range of applications and is in high demand, based on waste, is of considerable importance for Ukraine, as it contributes to the creation and development of a circular economy. An important aspect of managing a coke chemical enterprise (CCE) is the technical support of the blast furnace coke production process. The main functional element of technical support, along with the introduction of new technologies, automation and computerization of the technological process, is the continuous maintenance and repair of factory equipment. This element is implemented, among other things, through the use of GPP in routine and emergency repair works.

Among the areas of application of GPP at CCE, the following can be highlighted: processing of metal surfaces; polishing of paint and varnish coatings; cleaning and processing of equipment parts; polishing of parts surfaces; elimination of defects in production materials; use in laboratory and scientific research. It has been established that among the range of waste products generated in the coking of hard coal, the following can be considered as abrasive components of GPP: coal and coke dust; coke slag; gas cleaning by-products; coke oven deposits. On the other hand, by-products of chemical processes (phenols, ammonia and their derivatives) can be used in the composition of abrasive pastes, especially in the context of the synthesis of thermosetting resins or for correcting the pH and viscosity of pastes in order to achieve the desired characteristics for grinding and polishing various types of surfaces.

Keywords: pastes, grinding and polishing, abrasive component, surface, waste, by-products, coal dust, coke dust, coke slag.

Corresponding author: I.V. Sinkevich, e-mail: iysaam@gmail.com

Manuscript received 2025/02/20



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. 4,3. Умовн. друк. арк. 4,18. Наклад 150 прим. Зам. № 25-24.

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