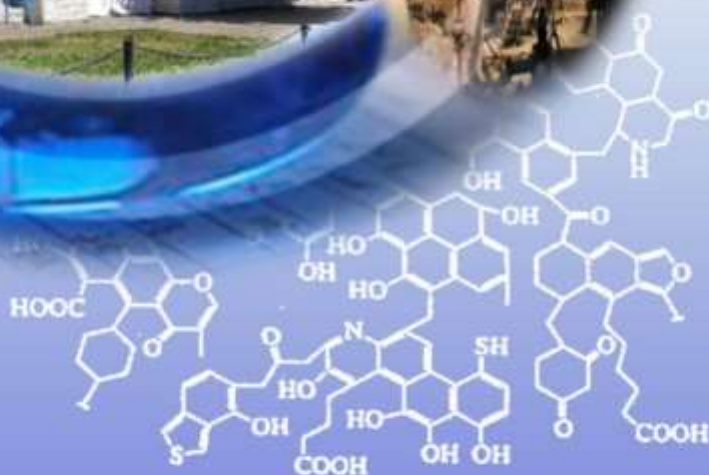




ISSN 1681-309X

ВуглеХімічний журнал



5

2024

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



Наказом МОН України від 02.07.2020 № 886

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

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

Вуглехімічний журнал індексується в міжнародній наукометричній базі

Index Copernicus

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Технічні науки (102; 161)

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

Члени редколегії: к.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. Мірошниченко (м. Харків), проф., д.т.н. А. М'яновскі (м. Глівіце, Польща), д.т.н., проф. В.О. Панасенко, 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. Гуляев, с.н.с., к.т.н. І.Д. Дроздник, проф., д.т.н. О.М. Касімов, проф., д.т.н. Є.Т. Ковальов, доц., к.т.н. Ю.В. Луценко, к.т.н. А.Ю. Мартинова, к.т.н. М.О. Соловійов, с.н.с., д.т.н. Ф.Ф. Чешко

ВуглеХімічний журнал

5

Науково-виробничий
журнал

Виходить шість номерів
на рік

Заснований у вересні
1993 р

ЗАСНОВНИКИ:

Українська науково-
промислова
асоціація
«УКРКОКС»

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

Державне
підприємство
«Державний інститут
по проектуванню
підприємств
коксухімічної
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.

- Котляров Є.І., Шульга І.В., Кизим М.О., Хаустова В.Є.** Хіміко-технологічна переробка бурого вугілля Ново-Дмитрівського родовища Харківської області 3
- Котляров Є.І., Шульга І.В., Кизим М.О., Хаустова В.Є.** Виробництво синтетичного моторного палива з кам'яного вугілля за використання різних способів газифікації 13
- Брик Д.В., Кульчицька-Жигайло Д.З., Гвоздевич О.В., Герльовський Ю.Я.** Перспективи термохімічної переробки солоного вугілля України 20
- Кравченко С.О., Фоміна В.М., Чаплянко С.В.** Розробка технологічної схеми підсушки вугільної шихти з застосуванням димових газів 29
- Мірошніченко Д.В., Шмельцер К.О., Кремер М.В., Ситник О.В., Авдіюк І.М.** Аспекти впливу на величину тиску розпирання вугільної шихти та металургійні властивості коксу. Повідомлення 1. Формування тиску розпирання в залежності від властивостей вугільних концентратів 34
- Гайнов А.Я., Григоров А.Б.** Нові ізоляційні вуглеводневі матеріали для захисту нафто- та газопроводів від корозії 48

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-5-1-60

© ДП «УХІН», «Вуглехімічний журнал», 2024
ISSN 1681-309X



Journal of Coal Chemistry

5

Contents

page.

Bimonthly scientific and
technical journal
Founded in 1993

FOUNDERS:

Ukrainian Scientific-
Industrial
Association
«UKRKOKS»

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

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

Mention of the source when
reprinting papers is
obligatory.

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

The price is subject to agree-
ment.

- Kotlyarov E.I., Shulga I.V., Kyzym M.O., Haustova V.E.** Chemical and technological processing of lignite from the Novo-Dmitrovskoye deposit in the Kharkiv region 3
- Kotlyarov E.I., Shulga I.V., Kyzym M.O., Haustova V.E.** Production of synthetic motor fuel from hard coal using various gasification methods 13
- Bryk D.V., Kulchytska-Zhygaylo D.Z., Hvozdevych O.V., Gerlevskiy Yu.Ya.** Prospects for thermochemical processing of salty coals in Ukraine 20
- Kravchenko S.A., Fomina V.M., Chaplianko S.V.** Elaboration of process diagram for coal blend drying using waste gases 29
- Miroshnichenko D.V., Schmeltser K.O., Kormer M.V., Sytnyk O.V., Avdeyuk I.M.** Aspects of influence on the value of coal blend bursting pressure and metallurgical properties of coke. Message 1. Formation of bursting pressure depending on the properties of coal concentrates 34
- Gaipov A.Y., Grigorov A.B.** New insulating hydrocarbon materials for protection oil and gas pipelines from corrosion 48

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-5-1-60

© SE «UKHIN», Journal of Coal Chemistry, 2024
ISSN 1681-309X



ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ПЕРЕРОБКА БУРОГО ВУГІЛЛЯ НОВО-ДМИТРІВСЬКОГО РОДОВИЩА ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ *© С.І. Котляров¹*Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України (НДЦ ІПР), 1а, 2 пов., пров. Інженерний, Харків, Україна, 611661*І.В. Шульга²*Державне підприємство «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут» (ДП «УХІН»), 7, вул. Весніна, Харків, Україна, 61023*М.О. Кизим³, В.С. Хаустова⁴

НДЦ ІПР

¹ Котляров Євген Іванович, канд. економ. наук, доц., зав. сектору економічної безпеки та енергозбереження, e-mail: ekotlarov@i.ua² Шульга Ігор Володимирович, канд. техн. наук, доц., с.н.с., зав. коксового відділу, e-mail: ko@ukhin.org.ua³ Кизим Микола Олександрович, член-кор. НАН України, докт. економ. наук, проф., головний наук. співр, e-mail: m.kyzym@gmail.com⁴ Хаустова Вікторія Євгенівна, докт. економ. наук, проф., директор, e-mail: v.khaust@gmail.com

Метою статті є оцінка доцільності організації виробництва синтез-газу з бурого вугілля, запаси якого в Україні є достатніми. У якості сировинної бази в статті розглядається вугілля Ново-Дмитрівського родовища, що розташоване на території Харківської області, балансові запаси якого по категоріям А+В+С₁ складають разом 380 млн т.

Для досягнення мети проаналізовані найбільш розповсюджені в світі технології газифікації вугілля: процес Lurgi (протиточна парокиснева газифікація крупнокускового вугілля (або брикетів) в стаціонарному шарі), процес Prenflo (прямоточна парокиснева газифікація в потоці пиловидного вугілля), процес Техасо (прямоточна киснева газифікація в потоці водовугільної пульпи).

Для кожного з цих процесів розроблені матеріальні баланси, оцінена якість отриманого синтез-газу, можливості організації виробництва необхідних енергоресурсів, рівень викидів шкідливих речовин в атмосферу, основні техніко-економічні показники. Розрахунки виконано для підприємства з потужністю по вугіллю 9 млн т робочої маси на рік.

На підставі проведених розрахунків для промислового впровадження рекомендовано процес Lurgi. Перевагами цього процесу є найнижчі температура і тиск процесу газифікації; близький до оптимального склад синтез-газу за співвідношенням H₂ : CO; найменші викиди діоксиду вуглецю, що утворюється при газифікації вугілля і підготовці синтез-газу для подальшого використання; найнижча виробнича собівартість підготовленого синтез-газу; найменші питомі капіталовкладення (в розрахунку на 1 тис. м³ підготовленого синтез-газу).

Обґрунтовано недоцільність застосування для газифікації бурого вугілля процесу Техасо, а також визначено напрями вдосконалення процесу Prenflo для його подальшого застосування в умовах Ново-Дмитрівського родовища.

Ключові слова: буре вугілля, Ново-Дмитрівське родовище, процеси газифікації, показники газифікації, синтетичне моторне паливо.

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

* Стаття підготовлена за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках реалізації проєкту «Створення виробництва синтетичного рідкого палива з вугілля в Україні у воєнний та повоєнний періоди» (реєстраційний номер проєкту 2022.01/0061), що відібраний для виконання за конкурсом «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

Українські національна безпека і незалежність визначаються, окрім іншого, й можливостями забезпечення енергетичної незалежності, тобто наявністю потужностей з виробництва паливно-енергетичних ресурсів у обсягах, що визначаються потребами внутрішнього споживання. Однією зі складових енергетичної безпеки є забезпечення потреб економіки в моторному паливі.

Війна призвела до втрати Україною потужностей з переробки нафти і газового конденсату і на даний час вся потреба в бензині, дизельному і авіаційному пальному, а також скрапленому газі для двигунів внутрішнього згорання покривається виключно за рахунок імпорتنих поставок.

Виходом з ситуації, що склалася, є організація виробництва моторного палива не нафтового походження.

Раніше виконані нами дослідження [1, 2] довели перспективність і економічну доцільність організації виробництва синтетичних моторних палив (далі – СМП) з сировини не нафтового походження, а саме з кам'яного вугілля, запаси якого є достатніми для задоволення потреб України в моторному паливі [3]. Найдоцільніший шлях виробництва СМП з кам'яного вугілля передбачає газифікацію вугілля з отриманням синтез-газу і подальший отримання з цього газу суміші вуглеводнів (синтетичної нафти) за реакцією Фішера-Тропша [4]. Сировиною для виробництва синтез-газу може бути не тільки кам'яне вугілля, а й інші вуглецевмісні речовини (буре вугілля, побутові відходи тощо), ресурси яких достатні для організації виробництва.

Метою даної статті є оцінка доцільності організації виробництва синтез-газу з бурого вугілля, запаси якого в Україні є достатніми для організації масового видобутку і переробки. У якості сировинної бази для виробництва синтез-газу в статті розглядається вугілля Ново-Дмитрівського родовища (Харківська область).

Для досягнення мети вирішувалися наступні завдання:

- дослідження родовища та властивостей вугілля, визначення потужності підприємства з виробництва СМП;
- аналіз найбільш розповсюджених у світі технологій газифікації вугілля та особливостей їх апаратурного оформлення;
- співставлення матеріальних балансів окремих технологій газифікації;
- співставлення техніко-економічних показників окремих технологій газифікації (капіталоемність, енергоємність, чисельність персоналу, можливості щодо організації супутнього виробництва енергоресурсів);
- оцінка окремих процесів газифікації бурого вугілля за локальними критеріями доцільності;
- вибір раціонального процесу газифікації бурого вугілля Ново-Дмитрівського родовища.

Всі висновки і пропозиції базуються на результатах, отриманих фахівцями Науково-дослідного центру індустріальних проблем розвитку НАН України і Державного підприємства «Український науково-дослідний вуглехімічний інститут» (ДП УХІН) під час проведення наукових досліджень.

Ново-Дмитрівське родовище бурого вугілля розташоване в північно-західній частині Донбасу в Харківській області та знаходиться безпосередньо на північний схід від м. Барвенкове. За детальної розвідки були виявлені балансові запаси сумарно по категоріям А+В 284,4 млн т та по категорії С₁ 95,6 млн т, разом 380 млн т. Також є дані про запаси за категорією С₂ в кількості 35 млн т, але в подальших розрахунках ці запаси не враховувалися.

Особливості залягання вугілля на цьому родовищі сприятливі для організації відкритого видобутку кар'єрним способом.

Головне промислове значення мають два пласти: III₂ та IV₂, відповідно, із запасами 75 % та 19,6 % від загальної кількості балансових запасів. Середня потужність пласта III₂ – 50 м, пласта IV₂ – 7,5 м.

Результати дослідження кернових проб, отриманих ДП «Бахмутгеологія», наведені в табл. 1 [3]. Середні по пластам дані технічного аналізу наступні: волога на робочу масу – 51,2 %; зольність на суху масу – 19,4 %; вміст загальної сірки в сухій масі – 2,45 %. Елементний склад органічної маси вугілля цього родовища характеризується наступними даними: вуглець – 68,0 %, водень – 6,0 %, кисень – 23,0 %, сірка, азот та інші елементи – 3,0 %.

Таблиця 1

Характеристика бурого вугілля Ново-Дмитрівського родовища

Показники	Одиниці виміру	Числові значення					
		Пласт III ₂			Пласт IV ₂		
		Min	Max	Сер.	Min	Max	Сер.
Дійсна щільність	г/см ³	1,01	1,49	1,25	1,11	1,34	1,19
Робоча вологість W_t	%	44,2	64,0	50,1	45,2	60,2	52,2
Зольність сухої маси A^d	%	6,3	40,6	14,2	9,6	39,9	24,5
Вихід летких речовин з пальної маси V^{daf}	%	42,8	75,7	58,3	52,3	69,6	61,7
Сірчистість сухої маси загальна S_t^d	%	0,5	8,7	2,7	0,2	7,6	2,2
Теплота згорання нижча робочої маси Q'_i	ккал/кг	1142	3628	2560	1120	2614	1906

Виходячи з обсягу запасів за категоріями А+В, подальші розрахунки виконані для виробничого комплексу потужністю 9 млн т вугілля на рік. Така потужність дозволяє відпрацювати родовище протягом 42-45 років, що співставно з термінами корисної експлуатації основного технологічного обладнання.

При виконанні подальших співставлень і оцінок у якості локальних критеріїв згідно із [5] запропоновані наступні, наведені в табл. 2.

Для вибору процесу газифікації бурого вугілля проаналізовані процеси газифікації вугілля, які мають найбільше промислове поширення в світі:

– протиточна парокиснева газифікація крупнокускового вугілля (або брикетів) в стаціонарному шарі (процес Lurgi [6]);

– прямоточна парокиснева газифікація в потоці пилувидного вугілля (процеси Koppers-Totzek, Siemens [7], Prenflo [8]); для подальших розрахунків і порівнянь обрано процес Prenflo;

– прямоточна киснева газифікація в потоці водувугільної пульпи (процеси Техасо [9], Conoco-Phillips); для подальших розрахунків і порівнянь обрано процес Техасо.

Особливості цих груп процесів у випадку переробки бурого вугілля наведені в табл. 3 (складено з урахуванням даних, наведених в роботах [1, 10]).

Процес Lurgi вимагає для газифікації грубокускове кам'яне вугілля, а у випадку газифікації бурого вугілля – його попереднє брикетування. Внаслідок того, що вугілля в середньому має робочу вологу 51,2 %, для ефективного брикетування необхідним є його підсушування, принаймні до вологості 19 %. Для сушіння вихідного вугілля передбачається використання парових сушарок, що передбачає організацію виробництва водяної пари.

Крім того, водяна пара необхідна безпосередньо для процесу газифікації (як джерело водню).

Таблиця 2

Локальні критерії оцінки доцільності різних процесів газифікації

Локальний критерій	Сутність
Ступінь використання вуглецю	Частка вуглецю вихідного вугілля, яка увійшла до складу синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів
Якість синтез-газу	Співвідношення між окремими компонентами
Енергонезалежність процесу	Рівень забезпеченості потреби в тепло- і електроенергії за рахунок власного виробництва
Екологічність процесу	Кількість викидів шкідливих речовин в атмосферу
Капіталоемність процесу	Відношення прогнозованої суми капіталовкладень до кількості очищеного синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів
Трудомісткість процесу	Відношення кількості очищеного синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів, до штатної чисельності персоналу
Виробнича собівартість синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів	Вартість матеріальних, енергетичних, трудових ресурсів, амортизаційні відрахування, інші витрати, безпосередньо пов'язані з виробництвом і очищенням синтез-газу

Передбачається, що необхідна для сушарок і процесу газифікації пара виробляється на підприємстві на власній котельні, яка працює на бурому вугіллі. Розрахунки показують, що з 9000 тис. т вихідного вугілля 1914 тис. т необхідно для отримання необхідної кількості пари. Відповідно безпосередньо на газифікацію може бути витрачено 7086 тис. т вугілля робочої маси.

В котельні передбачається використання когенерації, що дозволить частково задовольнити потреби підприємства в електроенергії.

При газифікації бурого вугілля за процесом Prenflo також необхідним є його попереднє підсушування; також, як і в процесі Lurgi, до реактору необхідно вводити водяну пару (як джерело водню).

Висока температура цього процесу газифікації дає можливість виробництва пари в котлах-утилізаторах за

рахунок охолодження отриманого синтез-газу. Ця пара частково задовольнить потреби підприємства. Для повного забезпечення потреб підприємства за процесом Prenflo також потрібна власна котельня, в якій передбачається спалювання 360 тис. т бурого вугілля.

Як котли-утилізатори, так і котельня поєднуються з потужностями з генерації електроенергії. За рахунок цього потреби підприємства в електроенергії частково задовольняються за рахунок власного виробництва. Недоліком процесу Prenflo є необхідність подрібнення вугілля до крупності часток 0,1 мм, що ускладнює подачу сировини до реактору. Зазвичай це робиться шляхом транспортування вугільного пилу спеціальним трубопроводом в інертному середовищі (азоті чи діоксиді вуглецю). В подальшому в процесі охолодження і очищення синтез-газу з'являється необхідність в обла-

днанні для вловлювання залишкового вугільного пилу, який не прореагував під час газифікації.

На відміну від попередніх процесів, процес Техасо передбачає газифікацію не вугілля, а водовугільної пульпи (суміш бурого вугілля і води у співвідношенні $\approx 1,5:1$). Принциповою відмінністю цього процесу від попередніх є те, що основним джерелом водню для

газифікації є не водяна пара, а та вода, яка входить до складу водовугільної пульпи. За переробки бурого вугілля, на відміну від кам'яного, внаслідок великої вологості сировини з водовугільної пульпи утворюється така кількість водяної пари, яка в декілька разів перевищує потребу для газифікації, а нерозкладена пара утворює велику кількість стічних вод.

Таблиця 3

Особливості підготовки і газифікації вугілля за різними процесами

Характеристика окремих стадій виробництва	Процес Lurgi	Процес Prenflo	Процес Техасо
Підготовка вугілля	Необхідність сушки вугілля та наступного брикетування	Сушка вугілля та подрібнення до розміру часток менше 0,1 мм	Подрібнення до розміру 0,08 мм з подальшим приготуванням водовугільної пульпи
Подача сировини в реактор	Завантаження брикетів	В середовищі інертного газу (азоту чи діоксиду вуглецю)	Подача водо вугільної пульпи
Основні матеріали, що додатково вводяться до реактору	Водяна пара; Кисень	Водяна пара; Кисень	Кисень
Режим газифікації	Температура – 1200 °С; Тиск – 2-3 МПа	Температура – 2000 °С; Тиск – 3 МПа	Температура – 1600 °С; Тиск – 3,5-4,0 МПа
Тривалість процесу газифікації	1-3 год	0,5-10 с	1-10 с
Супутні продукти газифікації	Буровугільна смола; Шлак газифікації	Шлак газифікації	Шлак газифікації
Супутні продукти очищення синтез-газу	Сульфат амонію; Сірчана кислота	Сульфат амонію; Сірчана кислота	Сульфат амонію; Сірчана кислота

Як і в процесі Prenflo, процес Техасо передбачає подрібнення вугілля до класу менше 0,1 мм, що вимагає використання обладнання для вловлювання вугільного пилу, який не прореагував під час газифікації.

Узагальнення перелічених особливостей процесів, що розглядаються, дозволяє сформулювати їх наступні переваги та недоліки, наведені в табл. 4.

За асортиментом продукції, що виробляється, та технологічним режимом газифікації (перед усім температурою і тиском) найбільш привабливими виглядають процеси Lurgi та Техасо.

Наступним кроком порівняння процесів газифікації є співставлення їх матеріальних балансів. В табл. 5 наведені результати розрахунків матеріальних потоків, виконаних для різних процесів газифікації бурого вугілля.

Окрім виробництва окремих продуктів газифікації, для подальшого синтезу вуглеводнів визначальним є співвідношення в синтез-газі кількості водню і оксиду вуглецю. Хімізм процесу синтезу вуглеводнів висуває наступну вимогу до співвідношення цих складових: кількість водню повинна бути більше кількості оксиду вуглецю принаймні вдвічі. Зазвичай, при газифікації

вугілля це співвідношення не досягається. За підготовки синтез-газу надлишкова кількість оксиду вуглецю окислюється до діоксиду та скидається в атмосферу разом з тим діоксидом вуглецю, що отримується безпосередньо в процесі газифікації. Тому, при характеристиці того чи іншого процесу газифікації необхідно розрізняти загальну кількість синтез-газу, що отримується при газифікації, та кількість синтез-газу, що має користь застосування, тобто безпосередньо використовується на подальший синтез вуглеводнів. Останній складається виключно з водню і оксиду вуглецю в оптимальному співвідношенні (2:1). Розрахунок кількості синтез-газу оптимального складу, що спрямовується на синтез вуглеводнів, та загальної кількості діоксиду вуглецю, що викидається в атмосферу, наведено в табл. 6. Під загальною кількістю діоксиду вуглецю розуміється сума наступних складових:

- діоксид, що утворюється безпосередньо при газифікації вугілля;
- діоксид, що утворюється при спалюванні надлишкового оксиду вуглецю;
- діоксид, що утворюється при спалюванні метану генераторного газу.

Дані щодо складу синтез-газу різних процесів прийняті у відповідності з [10]. Кількість синтез-газу наведено без врахування кількості аміаку і сірководню, які утворюються в процесі газифікації.

Таблиця 4

Порівняння основних процесів газифікації бурого вугілля

Процес	Переваги	Недоліки
Lurgi	Відносно низька температура і тиск процесу дозволяє використання більш дешевих конструкційних матеріалів для будівництва газогенераторів	Вимоги до вологості вугілля вимагають його попереднього підсушування. Необхідність брикетування вугілля. Низький тепловий потенціал синтез-газу не дозволяє отримувати пару в необхідній кількості. Спалювання частини вугілля для виробництва пари погіршує екологічність та економічність процесу газифікації. Утворювана буровугільна смола має вкрай низьку якість (великі вміст нерозчинних речовин, щільність та в'язкість), що ускладнює її кваліфіковану переробку. Реально можливе її використання лише у шляховому будівництві для доріг четвертої категорії
Prenflo	Підвищені (у порівнянні з попереднім процесом) можливості щодо використання енергетичного потенціалу синтез-газу для забезпечення виробництва необхідними ресурсами водяної пари (тепловою енергією). Висока інтенсивність процесу	Вимоги до вологості вугілля вимагають його попереднього підсушування. Ускладнена схема подачі вугільного пилу до реактору газифікації. Висока температура і тиск вимагають використання більш дорогих конструкційних матеріалів (у порівнянні з процесом Lurgi)
Texaco	Практична відсутність вимог до вологості вугілля, що використовується. При газифікації водовугільної пульпи отримується крім синтез-газу велика кількість пари з високим енергетичним потенціалом, достатнім для виробництва значної кількості електроенергії	Найвищі серед усіх процесів, що розглядаються, тиск та температура вимагають використання більш дорогих конструктивних матеріалів, зокрема вогнетривів за участі оксиду цирконію. Великий вміст вологи у бурому вугіллі разом з водою пульпи призводить до утворення в процесі газифікації великої кількості стічних вод, які потребують біохімічного очищення

Аналіз даних, наведених в табл. 6, свідчить, що найбільш придатним для синтезу вуглеводнів є синтез газ, який отримується в процесі Lurgi. Саме в цьому процесі синтез-газ найбільше відповідає вимогам наступного синтезу (співвідношення $H_2:CO$ дорівнює 1,9:1). Також цей процес характеризується найвищим ступенем переходу вуглецю вихідного вугілля в синтез-газ, що спрямовується на подальшу переробку.

У процесі Prenflo, синтез-газ якого характеризується найгіршим співвідношенням $H_2:CO$, отримується найменша кількість очищеного синтез-газу і, найбільша кількість діоксиду вуглецю, який викидається в атмосферу.

Ще одна важлива особливість, яку потрібно враховувати при співставленні окремих процесів, – це ступінь забезпеченості підприємства енергоресурсами

власного виробництва. В табл. 7 наведені результати попередніх розрахунків потреби в окремих енергоресурсах.

Пар, необхідний для газифікації та інших процесів, виробляється на самому підприємстві. Якщо для процесу Lurgi необхідна пара отримується при спалюванні частини вугілля в котельні, то в процесі Prenflo потреба в парі задовольняється шляхом використання тепла синтез-газу після реактору газифікації. В процесі Texaco газифікується водо вугільна пульпа, тому потреби в парі немає.

Тепло синтез-газу використовується не тільки для отримання пари, а й для подальшого виробництва електроенергії. За рахунок цього процесі Prenflo і Texaco дозволяють частково задовільнити потреби підприємства в електроенергії.

Таблиця 5

Укрупнені матеріальні баланси процесів газифікації бурого вугілля (в розрахунку на річне виробництво)

Стадія виробництва	Процес Lurgi	Процес Prenflo	Процес Техасо
Прихід			
Переробка вугілля, тис.т фактичної маси	9000,0	9000,0	9000,0
У тому числі спрямовується на виробництво пари, тис. т	3643,0	460,0	–
Надається до реактору газифікації, тис. т	4339,2 *	5124*	9000,0
Подача кисню на газифікацію, млн. м ³	1968,0	1745,0	2600,0
Подача пари на газифікацію, тис т	5342	150	-
Вихід			
Синтез-газ (приведений до 0 °С та 101,3 кПа), млн. м ³	5896,2	6162,3	6912,9
Смола буровугільна, тис. т	233,3	–	–
Сульфат амонію, тис. т	35,0	43,2	45,0
Сірчана кислота (за вирахуванням власного споживання), тис. т	168,2	207,6	216,3
Шлак від газифікації	662,7	783,9	852,0
Шлак від котельні	189,3	68,2	–
Стічні води, млн. м ³	3495	1049	7605

*3 урахуванням підсушування вугілля до вологи 19 %

Таблиця 6

Характеристика очищеного синтез-газу

Стадія виробництва	Процес		
	Lurgi	Prenflo	Техасо
Кількість синтез-газу, що надійшла на очищення, усього, млн. м ³	5896,2	6162,3	6912,9
Кількість синтез-газу в розрахунку на 1 т вугілля сухої маси, що надійшло на переробку, м ³	1705	1462	1574
Склад очищеного синтез-газу, % (об.)			
H ₂	40	30	35
CO	21	60	52
CO ₂	30	10	13
CH ₄	9	–	–
Співвідношення H ₂ :CO в синтез-газі до очищення	1,9 : 1	1 : 2	1 : 1,5
Кількість очищеного синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів, млн. м ³	3537,7	2773,1	3629,3
Загальна кількість CO ₂ , що скидається в атмосферу, млн. м ³	2358,5	3389,2	3283,6
Частка вуглецю вихідного вугілля, що перейшла у підготовлений синтез-газ, %	33,3	21,4	26,9

Отже, за критерієм енергонезалежності найбільшу перевагу має процес Техасо, тоді як процес Lurgi має найменшу привабливість.

Для оцінки екологічності процесу розраховано суму екологічного податку, ставки якого диференційовані за

різними шкідливими речовинами і опосередковано враховують розмір шкоди, що спричиняє кожна речовина оточуючому середовищу. Розрахунок виконано відповідно до вимог Податкового кодексу [11] і наведено в табл. 8.

Таблиця 7

Потреба в енергоресурсах різних процесів газифікації

Енергоносій	Процес Lurgi	Процес Prenflo	Процес Техасо
Загальна потреба в парі, тис. т	5342	150	–
Вода технічна для отримання пари (після хімічного очищення) або водо вугільної пульпи та інших технологічних потреб, тис. м ³	5609	157	13500
У тому числі:			
– для пари котельні;	5609	-	–
– для пари, що отримується за охолодження синтез-газу	–	2643	4147
Потреба в електроенергії, МВт×год/рік	88443	354332	397517
у тому числі:			
власне виробництво	–	215200	337700
Покупна електроенергія	88443	139132	59817
Частка електроенергії власного виробництва в загальному споживанні, %	–	61	85

Таблиця 8

Екологічні характеристики процесів газифікації

Показник	Процес Lurgi	Процес Prenflo	Процес Техасо
Шкідливі речовини, що викидаються в атмосферу			
Буровугільний пил, т	1800	339	-
діоксид сірки, т	48000	9028	-
оксиди азоту, т	17600	3310	-
діоксид вуглецю, тис. т	6510	7010	6450
Екологічний податок за викиди в атмосферу			
Загальна сума податку на викиди в атмосферу, тис. грн.	364357,2	242096,2	193500,0
Податок в розрахунку на 1 т вугілля, що переробляється	40,48	26,90	21,50
Податок в розрахунку на 1 тис. м ³ синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів	102,99	87,30	53,32

Кількість буровугільного пилу, оксидів азоту і діоксиду сірки визначалась, виходячи з кількості вугілля, що спалюється на котельні.

В розрахунках для процесів Lurgi та Prenflo врахована кількість діоксиду вуглецю, яка утворюється при роботі котельні. По всім трьом процесам також врахована кількість цієї шкідливої речовини, що утворюється при очищенні синтез-газу.

Найбільша сума екологічного податку, яка характерна для процесу Lurgi, пояснюється тим, що приблизно 20 % вугілля, що надходить на переробку, спалюється в котельні для отримання пари.

Найкращі показники за викидами в атмосферу має процес Техасо, за яким все вугілля, що надходить на переробку, підлягає газифікації (без відволікання на отримання пари в котельні). Але висока конституційна волога бурого вугілля (51,2 %) і подальша газифікація водовугільної пульпи, яка також містить воду, призводить до утворення такої кількості стічних вод, яка буде

загрожувати існуванню всієї екосистеми басейну річки Сіверський Донець.

Саме ця обставина не дозволяє обрати цей процес для переробки бурого вугілля.

Отже, для впровадження, виходячи з кількості викидів в атмосферу і скидів у водні об'єкти шкідливих речовин, може бути рекомендований процес Prenflo.

Узагальнюючими показниками, за допомогою яких можна робити співставлення окремих процесів, є такі економічні показники, як собівартість виробництва, продуктивність праці та питомі капіталовкладення на виробництво 1 тис.м³ підготовленого синтез-газу.

Оцінка витрат на виробництво очищеного і підготовленого для подальшої переробки синтез-газу здійснювалася у відповідності до методики, яка застосовується на коксохімічних підприємствах при калькулюванні собівартості коксу [12]. Вибір методики обумовлюється тим, що як одержання коксу, так і одержання синтез-газу відносяться до т.зв. «комплексних» виробництв, за

яких в єдиному технологічному процесі з однієї сировини отримується одночасно декілька продуктів. У нашому випадку, в процесі Lurgi крім синтез-газу отримується буровугільна смола; при очищенні синтез-газу крім підготовленого газу отримуються сульфат амонію та сірчана кислота. В таких випадках визначається загальна сума витрат на виробництво, яка потім розподіляється між окремими продуктами. Процедура розподілу загальної суми витрат виглядає наступним чином:

– собівартість нецільових (супутніх) продуктів (буровугільна смола, сульфат амонію, сірчана кислота) визначається виходячи з діючих цін за вирахуванням планової суми прибутку (так звана «тверда оцінка»);

– витрати на виробництво основного продукту (синтез-газу) визначаються як загальна сума витрат на переробку за вирахуванням собівартості супутніх продуктів; саме решта витрат вважається собівартістю основного продукту.

Собівартість синтез-газу, підготовленого для подальшого використання (С), визначається наступними чинниками:

– вартість бурого вугілля – грн/т (Ц);

– витрати бурого вугілля на отримання і очищення синтез-газу – т/тис.м³ (Р);

– витрати на переробку бурого вугілля на синтез газ – грн/тис.м³ (В).

В узагальненому вигляді виробнича собівартість підготовленого синтез-газу може бути описана наступним рівнянням:

$$C = Ц \times P + B \quad (1)$$

До витрат на переробку бурого вугілля в синтез-газ в розрахунках віднесено витрати на:

– придбання технічної води та матеріалів для її підготовки;

– придбання електроенергії;

– оплату праці персоналу з відрахуваннями на єдиний соціальний внесок;

– амортизаційні нарахування.

Експертно оцінено та включено до складу витрат на переробку вугілля витрати на ремонт і утримання обладнання, а також загальновиробничі витрати. В складі витрат враховано суму екологічного податку.

Результати розрахунків витрат на переробку бурого вугілля за різними процесами наведено в табл. 9.

Таблиця 9

Оцінка витрат на отримання і очищення синтез-газу за різними процесами газифікації, грн./тис. м³ синтез-газу, підготовленого для подальшого використання

Процес газифікації	Сума витрат на переробку вугілля	Собівартість попутної продукції (в розрахунку на тис. м ³ підготовленого синтез-газу)	Сума витрат, віднесених на собівартість синтез-газу (без врахування вартості вугілля)
Lurgi	700	600	100
Prenflo	700	370	330
Texaco	860	370	490

На даний час видобуток бурого вугілля в Україні відсутній і його вартість не може бути достовірно оцінена. Враховуючі дані, наведені в табл. 5, 6, 9, вираз (1) для окремих процесів може мати наступний вигляд:

– для процесу Lurgi:

$$C = 2,5Ц + 100; \quad (2)$$

– для процесу Prenflo:

$$C = 3,2Ц + 330; \quad (3)$$

– для процесу Texaco:

$$C = 2,5Ц + 490. \quad (4)$$

Аналіз цих залежностей показує, що за будь-якої ціни бурого вугілля процес Lurgi є найбільш привабливим за рівнем собівартості. Це пояснюється в першу чергу витратами вугілля на 1 тис. м³ синтез-газу.

Різні процеси газифікації порівнювалися також за продуктивністю праці та капіталоемністю окремих процесів (табл. 10).

Як свідчать наведені дані, найбільш привабливим процесом газифікації за показником «продуктивність

праці» є процес Texaco, найменш привабливим – процес Prenflo. Щодо капіталоемності – маємо зворотну тенденцію: найбільш інвестиційно привабливим є процес Lurgi, найменш привабливим – процес Texaco.

Проведені порівняння дозволяють зробити висновок, що для газифікації бурого вугілля можуть бути використані процеси Lurgi або Prenflo. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на підвищення екологічності цих процесів. Одним з варіантів є заміна бурого вугілля при виробництві пари на інше паливо (метан газифікації, метан-етанова фракція, що отримується при синтезі моторних палив тощо).

Використання процесу Prenflo може бути доцільним, якщо вирішити проблему збагачення воднем очищеного синтез-газу. Додатковий водень може бути отриманий одним з відомих в промисловості процесів, які були розглянуті нами раніше [13].

Таблиця 10

Техніко-економічні показники окремих процесів газифікації бурого вугілля

Показник	Процес Lurgi	Процес Prenflo	Процес Техасо
Кількість підготовленого синтез-газу, млн. м ³	3537,7	2773,1	3629,3
Чисельність персоналу, осіб	2607	2495	2479
Продуктивність праці, тис.м ³ /особу	1357	1111	1464
Капіталовкладення, млн грн.	16009,7	13712,2	22233,9
Капіталовкладення на 1 тис. м ³ очищеного синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів, тис. грн/тис.м ³	4,525	4,945	6,126

Використання процесу Техасо для газифікації бурого вугілля можливо тільки в разі вирішення проблеми утилізації великої кількості стічних вод.

Висновки

1. Буре вугілля Ново-Дмитрієвського родовища є придатним для газифікації та подальшої переробки на синтетичні моторні палива;

2. Для газифікації бурого вугілля Ново-Дмитрієвського родовища найбільш перспективним є процес Lurgi, який відрізняється від інших:

– найнижчими температурою і тиском процесу газифікації, що дозволяє використовувати більш дешеві конструкційні матеріали для будівництва реакторів;

– близьким до оптимального складом синтез-газу за співвідношенням H₂:CO;

– найменшими викидами діоксиду вуглецю, що утворюється при газифікації вугілля і підготовці синтез-газу для подальшого використання;

– найнижчою виробничою собівартістю підготовленого синтез-газу;

– найменшими питомими капіталовкладеннями (в розрахунку на 1 тис. м³ підготовленого синтез-газу).

3. Також, можливе застосування для газифікації бурого вугілля процесу Prenflo, який не потребує попереднього брикетування вугілля і у порівнянні з процесом Lurgi та витрачає менше вугілля для виробництва пари. Необхідною умовою для застосування процесу Prenflo є покращення складу синтез-газу для досягнення необхідного співвідношення H₂:CO. Можливим варіантом вирішення проблеми є додавання до синтез-газу водню, який отримується окремо від процесу газифікації.

4. Буре вугілля Ново-Дмитрієвського родовища має вологу в середньому на рівні 51,2 %. Приготування з такого вугілля водовугільної пульпи з її подальшою газифікацією (як це передбачає процес Техасо) призводить до утворення великої кількості стічних вод, утилізація яких не є можливою.

В умовах Ново-Дмитрієвського родовища широкомасштабне застосування процесу Техасо призведе до негативних екологічних наслідків і може бути загрозою для екосистеми басейну річки Сіверський Донець.

В даному випадку це унеможливило використання процесу Техасо для газифікації бурого вугілля без вирішення проблеми утилізації великої кількості стічних вод.

5. Для зменшення шкідливих викидів в атмосферу за процесами Lurgi та Prenflo необхідно вирішити питання забезпечення виробництва паром без спалювання в котельні частини бурого вугілля.

Бібліографічний список

1. **Кизим М.О.** Техніко-економічні засади створення підгалузі з виробництва синтетичного рідкого палива в Україні: кол. монографія. / **М.О. Кизим, В.Є. Хаустова, В.В. Шнілевський [та ін.]**. – Харків: ФОП Лібуркіна Л.М., 2022. – 212 с.

2. **Кизим М.О.** Технічні й економічні аспекти створення підгалузі з виробництва синтетичного рідкого палива в Україні. / **М.О. Кизим, В.Є. Хаустова, В.В. Шнілевський, Є.І. Котлярів** // Проблеми економіки. – 2022. – № 4. – С. 59–79. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2022-4-59-79>.

3. **Шульга І.В.** Перспективна сировинна база процесів виробництва синтетичного рідкого палива з українського вугілля / **І.В. Шульга, Є.І. Котлярів, М.О. Кизим, В.Є. Хаустова** // Вуглехімічний журнал. – 2023. – № 5. – С. 3-11. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-202-0-5-3-11>.

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

5. **Котлярів Є.І.** Щодо критеріїв оцінювання різних технологій газифікації вугілля / **Є.І. Котлярів, І.В. Шульга** / Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Конкурентоспроможність та інновації: проблеми науки та практики». Харків, 24 листопада 2023. С. 1026-1030 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ndc-ipr.org/publications/>.

6. **Sekhar Bhattacharyya.** Advances in coal mining technology and sustainable mining techniques / **Sekhar Bhattacharyya, Long Fan, Sikandar Azam, Shimin Liu** /

In Woodhead Publishing Series in Energy, *The Coal Handbook (Second Edition)*. – Woodhead Publishing, 2023. – Vol. 1. – P. 263-321. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824328-2.00011-X>.

7. **Binxuan Zhou**. Two-stage gasification process simulation and optimization of pulverized coal for hydrogen-rich production using Aspen plus // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – Vol. 49. – Part D. – P. 849-860. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.033>.

8. **Breault R.W.** Gasification Processes Old and New: A Basic Review of the Major Technologies / **R.W. Breault**. – Energies. – 2010. – 3. – P. 216-240. <https://doi.org/10.3390/en3020216>.

9. **Cornils B.** Gasification of hydrogenation residues using the Texaco coal gasification process. **B. Cornils, J. Hibbel, P. Ruprecht, J. Langhoff, R. Dürrfeld** // *Fuel Processing Technology*. – Vol. 9. – Iss. 3. – 1984. – P. 251-264. [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(84\)90045-6](https://doi.org/10.1016/0378-3820(84)90045-6).

10. **Рудика В.І.** Порівняльний аналіз ефективності технологій зрідження вугілля / **В.І. Рудика** // *Бізнес інформ*. – 2017. – № 7. – С. 317-324.

11. Податковий кодекс. Закон України від 02.12.2010 р. № 2755-VI / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text>.

12. Довідник коксохіміка. Т. 6. Економіка, організація та управління коксохімічним підприємством. – Харків: ВД «Інжсек», 2010. – 320 с.

13. **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. – 2023. – С. 37-44. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-6-37-44>.

Рукопис надійшов до редакції 19.07.2024

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-5-3-12

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

CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PROCESSING OF LIGNITE FROM THE NOVO-DMITROVSKOYE DEPOSIT IN THE KHARKIV REGION

© **E.I. Kotlyarov**, Ph.D. in economics (Scientific Research Centre for Industrial Problems of Development of the National Academy of Sciences of Ukraine (SRC for IPD of NASU), 1a Inzhenernyi lane, Kharkiv, 61166, Ukraine), **I.V. Shulga**, Ph.D. in technical sciences (State Enterprise “Ukrainian State Research Institute for Carbochemistry (UKHIN)”, 7 Vesnina str., Kharkiv, 61023, Ukraine), **M.O. Kyzym**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Economics, **V.E. Haustova**, Doctor of Economics (SRC for IPD of NASU)

The aim of the article is to assess the feasibility of organising the production of synthesis gas from lignite, which has sufficient reserves in Ukraine. As a raw material base, the article considers the coal of the Novo-Dmitrivske deposit located in the Kharkiv region, whose balance sheet reserves in categories A+B+C1 amount to 380 million tonnes in total.

To achieve this goal, the most common coal gasification technologies in the world are analysed: the Lurgi process (countercurrent steam-oxygen gasification of coarse coal (or briquettes) in a stationary bed), the Prenflo process (direct-flow steam-oxygen gasification in a pulverised coal stream), and the Texaco process (direct-flow oxygen gasification in a water-coal pulp stream).

For each of these processes, material balances were developed, the quality of the synthesis gas produced, the possibility of organising the production of the necessary energy resources, the level of emissions of harmful substances into the atmosphere, and the main technical and economic indicators were assessed. The calculations were performed for an enterprise with a coal capacity of 9 million tonnes of working weight per year.

Based on the calculations, the Lurgi process is recommended for industrial implementation. The advantages of this process are the lowest temperature and pressure of the gasification process; close to the optimal composition of synthesis gas in terms of the ratio of H₂ : CO ratio; the lowest emissions of carbon dioxide generated during coal gasification and preparation of synthesis gas for further use; the lowest production cost of prepared synthesis gas; the lowest specific investment (per 1 thousand m³ of prepared synthesis gas).

The inexpediency of using the Texaco process for lignite gasification is substantiated, and the directions of improvement of the Prenflo process for its further application in the conditions of the Novo-Dmitrivske field are determined.

Keywords: lignite, Novo-Dmytrivske field, gasification processes, gasification indicators, synthetic motor fuel.

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

ВИРОБНИЦТВО СИНТЕТИЧНОГО МОТОРНОГО ПАЛИВА З КАМ'ЯНОГО ВУГІЛЛЯ ЗА ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ СПОСОБІВ ГАЗИФІКАЦІЇ *© С.І. Котляров¹*Науково-дослідний центр Індустріальних проблем розвитку НАН України (НТЦ ІПР), пров. Інженерний 1а, м. Харків, 61166, Україна*І.В. Шульга²*ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)», вул. Весніна, 7, м. Харків, 61000, Україна*М.О. Кизим³, В.Є. Хаустова⁴

НДЦ ІПР

¹ Котляров Євген Іванович, канд. економ. наук, доц., зав. сектору економічної безпеки та енергозбереження, e-mail: ekotlarov@i.ua² Шульга Ігор Володимирович, канд. техн. наук, доц., с.н.с., зав. коксового відділу, e-mail: ko@ukhin.org.ua³ Кизим Микола Олександрович, член-кор. НАН України, докт. економ. наук, проф., головний наук. співр, e-mail: m.kyzym@gmail.com⁴ Хаустова Вікторія Євгенівна, докт. економ. наук, проф., директор, e-mail: v.khaust@gmail.com

Метою статті є оцінка доцільності організації виробництва синтез-газу з малометаморфованого кам'яного вугілля, запаси якого в Україні сягають 28 млрд т, що перевищує 60 % від загальної кількості наявних запасів. У якості сировинної бази в статті розглядається довгополум'яне вугілля Західного Донбасу, розташованого на території Дніпропетровської області, де діють потужні підприємства з видобутку та збагачення вугілля.

Для досягнення поставленої мети проаналізовані найбільш розповсюджені в світі технології газифікації вугілля: процес Lurgi (протиточна парокиснева газифікація крупнокускового вугілля (або брикетів) в стаціонарному шарі), процес Siemens (прямоточна парокиснева газифікація в потоці пиловидного вугілля), процес Техасо (прямоточна киснева газифікація в потоці водовугільної пульпи).

Для кожного з цих процесів розроблені матеріальні баланси, оцінена якість отриманого синтез-газу, можливості організації виробництва необхідних енергоресурсів, рівень викидів шкідливих речовин в атмосферу, основні техніко-економічні показники. Розрахунки виконано для підприємства з потужністю по вугіллю 550 тис т робочої маси на рік.

На підставі проведених розрахунків для промислового впровадження рекомендовано процес Техасо. Перевагами цього процесу є відсутність стадії отримання пари для газифікації, дефіцитність водного циклу, що практично виключає утворення стічних вод та можливість використання для газифікації забрудненої води з інших джерел; найбільший сумарний вміст в отриманому синтез-газу водню та оксиду вуглецю; максимальні освоєна потужність виробничих реакторів та найбільша кількість потужностей, які створюються в світі саме за цією технологією; утилізація тепла отриманого газу для отримання великої кількості електричної та теплової енергії.

Ключові слова: кам'яне вугілля, Західний Донбас, процеси газифікації, показники газифікації, синтетичне моторне паливо.

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

* Стаття підготовлена за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках реалізації проєкту «Створення виробництва синтетичного рідкого палива з вугілля в Україні у воєнний та повоєнний періоди» (реєстраційний номер проєкту 2022.01/0061), що відібраний для виконання за конкурсом «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

Україна не має власних значних покладів нафти та природного газу, через що практично повністю залежить від імпорتنих поставок цієї сировини та продуктів її переробки [1]. Тому актуальною є задача виробництва з іншої сировини замінників продуктів, які в даний час отримуються переробкою імпорتنих енергоносіїв.

Такою сировиною може бути викопне вугілля, загальні дійсні балансові запаси якого в Україні за категоріями А+В+С₁ складають майже 45 млрд т, з яких на частку Донецького басейну припадає більш ніж 93 %, Львівсько-Волинського – ≈4,5 % та Дніпровського буровугільного – ≈2 % [2]. В наявних запасах переважає малометаморфований вугілля – буре, довгополум'яне та газове, його частка перевищує дві третини. При цьому дві останні марки, що відносяться до кам'яного вугілля, видобуваються у промислових масштабах та вигідно відрізняються від бурого вугілля кращими технологічними властивостями – меншим вмістом вологи, кращою кускуватістю, збагачуваністю, більшим вмістом вуглецю, який потрібний для отримання з нього синтетичних вуглеводнів.

Отже, структурна перебудова господарства України з орієнтацією на використання як джерела енергії та хімічної сировини твердих горючих копалин має передбачати перш за все використання малометаморфованого кам'яного вугілля – довгополум'яного та газового. Найбільші обсяги видобутку цього вугілля зараз наявні в Західному Донбасі, де працюють кілька великих вуглевидобувних підприємств та є потужності зі збагачення вугілля. Тому ДП «УХІН» згідно із завданням ДП «ГИПРОКОКС» були досліджені властивості малометаморфованого вугілля, що видобувається низкою найбільших шахт Західного Донбасу [3]. Зіставна характеристика технологічних властивостей всього цього вугілля, за даними досліджень його представницьких проб в ДП «УХІН», наведена в табл. 1.

За комплексом технологічних властивостей як сировинна база газифікації рекомендується енергетичне вугілля шахт 3 та 4, яке не використовується для коксування. Зараз можливість його енергетичного використання теж проблематичні через втрату Україною більшої частини вугільної генерації. Вугілля цих підприємств, які мають найбільші обсяги видобутку, характеризується мінімальною сірчистістю, сприятливим елементним складом та достатньо високою теплою спалювання, що сприяє збільшенню виходу газу за їх газифікації, підвищенню його теплоти спалювання та зростанню ККД газифікації.

Раніше [4] було показано, що найбільш підготовленими до промислового впровадження в Україні є наступні технології газифікації провідних світових розробників:

- в нерухомому (стаціонарному) шарі німецької фірми Lurgi;
- в потоці вугледуттєвої суміші іншої німецької фірми Siemens;
- протиточна киснева газифікація водовугільної пульпи за технологією Техасо (США).

Для різних варіантів технологічного оформлення процесу були визначені наступні технологічні параметри:

- кількість та склад дуття (витрати пари/води та кисню на тонну робочої маси вугілля);
- параметри стану реакційної зони (температура та тиск);
- розміри та кількість реакторів;
- кількість та властивості отриманого газу (вихід газу з 1 т робочої маси вугілля, вміст в ньому домішок, які підлягають видаленню, склад газу після очищення, його густина та теплота спалювання).

За визначення технологічних параметрів спочатку на підставі даних джерел науково-технічної інформації щодо світової практики роботи різних промислових установок з газифікації вугілля, систематизованих в роботах [5, 6], попередньо задавались кількістю та складом дуття, а також параметрами стану реакційної зони. Потім на підставі даних про властивості вугілля шахти 4 (як тієї, що має найбільші обсяги видобутку) склали матеріальний та тепловий баланси газифікації у відповідності з методикою, викладеною в роботі [7].

Розрахунки вели на 100 кг вихідного вугілля. За складання матеріального балансу кількість молей основних компонентів генераторного газу – CO, CO₂, H₂, H₂O (водяна пара, яка не прореагувала) визначали з системи чотирьох рівнянь з чотирма невідомими:

- баланс вуглецю:



де C_{вих} – кількість молей вуглецю у вугіллі, що надходить в зону газифікації;

- баланс водню:



де H₂O_{вих} – кількість молей води, що надходить з вихідним вугіллям;

H₂O_д – кількість молей водяної пари, що надходить з дуттям (або води, використаної для приготування пульпи);

H₂вих – кількість молей водню, що надходить з вихідним вугіллям;

- баланс кисню:



де: 2 – кількість атомів кисню в молекулі CO₂; O₂вих – кількість молей кисню, що надходить з вихідним вугіллям; O₂д – кількість молей кисню, що надходить з дуттям.

Таблиця 1

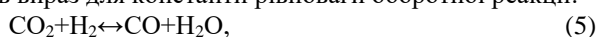
Технологічні властивості вугілля

Показник	Символ і одиниця виміру	Підприємство			
		1	2	3	4
Обсяг видобутку	тис т	1714	1237	1520	2398
Зольність рядового вугілля	A^d , %	37,5	35,0	39,9	41,6
Вологість робоча	W^r , %	6,5	8,5	11,0	10,4
Вихід летких речовин	V^d	35,6	33,6	36,3	37,2
Сірчистість загальна сухої маси	S_t^d	2,3	2,5	1,5	1,1
Елементний склад:	%				
Вуглець	C^d	71,9	71,7	70,9	69,0
Водень	H^d	3,5	5,4	5,3	5,1
Азот	N^d	1,3	1,3	1,3	1,2
Сірка	S_t^d	2,3	2,5	1,5	1,1
Кисень	O_d^d	6,0	4,1	6,0	8,6
Зольність збагаченого вугілля	A^d	15,0	15,0	15,0	15,0
Теплота спалювання нижча Q_i^r	МДж/кг	26,8	26,1	24,6	25,7
Температура плавлення золи	°С	1490	1420	1420	1450
Товщина пластичного шару	$У$, мм	13	8	6	6

Як четверте рівняння для технологій газифікації в потоці (Siemens та Техасо) використовували співвідношення концентрацій (кількості молей) різних речовин в отриманому газі за практичними даними [6,7]:

$$K = \frac{CO}{CO_2 \cdot H_2} \quad (4)$$

Для більш повільного процесу газифікації в стаціонарному шарі (технологія Lurgi) четвертим рівнянням був вираз для константи рівноваги оборотної реакції:



$$K_p = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2} \quad (6)$$

Величину K_p визначали згідно із залежністю її логарифму від абсолютної температури (в К) в реакційній зоні T :

$$\lg K_p = 7,62 - 1,61 \lg T - \frac{2559}{T} - \frac{21261}{T^2} \quad (7)$$

Отримане рішення системи з чотирьох рівнянь перевіряли шляхом складання теплового балансу (за вищою межею) отримання генераторного газу розрахованого складу за умов раніше прийнятих температур газу в реакційній зоні та на виході з реактору. Припустимо величину теплових втрат приймали на рівні 5-10 %. Така частка втрат свідчила про правильність прийнятих значень витрати пари (води) та кисню в складі дуття на газифікацію.

У випадку виходу величини теплових втрат за межі прийнятого інтервалу 5-10 % витрати пари (води) та кисню коригували у відповідності з результатами розрахунку: якщо теплові втрати занадто великі, знижува-

ли кількість молей кисню, який подається в складі дуття за рахунок відповідного збільшення кількостей молей води (пари). Подальший розрахунок вели методом послідовних наближень.

За кількістю молей утворених продуктів газифікації визначали вихід генераторного газу в м³/т вугілля. Кількість домішок, які потрібно вилучити з газу, визначали наступним чином:

– для смоли за газифікації в стаціонарному шарі – 50 % від ресурсів її утворення без доступу повітря;

– для аміаку – виходячи з витрати на його утворення 25 % азоту вугілля (за припущення, що решта його переходить в газ);

– для сірководню – виходячи з витрати на його утворення 80 % сірки вугілля (за припущення, що решта її переходить до шлаку).

Склад генераторного газу визначали за кількістю молей утворених продуктів газифікації, а потім по визначеному складу розраховували властивості газу – його густину та теплоту спалювання.

Розміри реакторів та їх продуктивність приймали за наявними в джерелах науково-технічної інформації даним щодо промислово освоєних в світі технологічних процесів, а необхідну кількість реакторів – згідно із заданими обсягами переробки вугілля та розрахованими кількостями отриманого газу.

Технологічні параметри газифікації для різних варіантів здійснення процесу наведені в табл. 2. Аналіз цих даних свідчить, що в технології Lurgi потрібна найбільша витрата пари. Це пов'язане в першу чергу з недостатньою інтенсивністю процесу (малими швидкостями газифікації та великим часом перебування твердофаз-

ного матеріалу в реакторі – протягом 0,5-1,5 години), що вимагає застосування надлишку пари, ступінь розк-

ладення якої не перевищує 50 % за реакцією:
 $C+H_2O \rightarrow CO+H_2$.

(8)

Таблиця 2

Технологічні параметри газифікації

Параметр	Одиниця виміру	Lurgi	Siemens	Texaco
Витрата компонентів дуття:				
Пара	т/т вугілля	0,44	0,11	-
Кисень	м ³ /т вугілля	560	850	536
Вода на приготування пульпи	т/т вугілля	-	-	1,00
Максимальна температура	°С	950	1300	1600
Тиск	атм	25	7	40
Вихід очищеного газу	м ³ /т вугілля	1680	2120	1652
Склад очищеного газу:				
СО	% (об.)	42,7	48	55
Н ₂		30,6	27	31
СО ₂		20,7	10	12
СН ₄		5,7	≤1	≤1
Н ₂ +Аг		0,3	14	≤1
Вміст домішок в газі:				
Н ₂ С	г/м ³	5,5	4,5	5,5
NH ₃		2	1,4	2
Смола		24	-	-
Теплотвірна здатність газу	ккал/м ³	2583	2248	2565
Густина газу	кг/м ³	1,011	0,831	0,958
Розміри реактору:				
Діаметр	м	4,7	2	7,6
Висота		11,0	20	40
Кількість робочих реакторів		2	3	1

Для забезпечення здійснення такого ендотермічного процесу з поглинанням тепла потрібно спалювати в нижній частині реактору значну кількість вуглецю палива. Внаслідок цього газ характеризується максимальним вмістом СО₂, який є баластом. Крім того, за знаходження вугілля протягом достатньо тривалого часу в верхній частині реактору (де практично відсутній кисень) розвиваються процеси термічної деструкції, внаслідок чого утворюються помітні кількості метану та смоли, що в даному випадку є побічними продуктами. Виникає необхідність додаткових стадій – очищення газу від смоли та конверсії метану. В цілому сумарна кількість СО+Н₂, отримуваних з 1 т вугілля, за використання технології Lurgi найменше (1230 м³/т). Крім цього, дана технологія вимагає використання грубого сортового вугілля (більше 6 мм), який найбільш дефіцитний через розвиток механізованих технологій видобутку, які надміру подрібнюють вугілля.

Технологія Siemens характеризується раціональнішим складом дуття – більшою кількістю використову-

ваного кисню та меншою – водяної пари. Внаслідок цього вміст СО₂ в газі найменший серед усіх трьох процесів, а сумарний вихід СО та Н₂ – максимальний (1590 м³/т вугілля).

За використання технології Texaco виключається використання пари в складі дуття. Замість цього газифікується водо-вугільна пульпа. Витрати тепла на випаровування води в реакторі знижують вихід газу та ККД реактору. Частина цього зниження компенсується застосуванням підвищених температур та тиску. Тому вміст СО₂ в газі у порівнянні з попереднім процесом зростає лише на 2 % - від 10 % до 12 %. Сумарний вміст в газі СО та Н₂ максимальний, але загальний вихід цих компонентів на 1 т вугілля (1420 м³) менший, ніж за технологією Siemens, через вже зазначене зниження виходу газу.

Вміст домішок (сірководню та аміаку) в отримуваному газі визначається в першу чергу сірчистістю вихідного вугілля та вмістом в ньому азоту, а також загаль-

ною кількістю отриманого газу – чим вищий вихід газу, тим вміст домішок в ньому нижчий.

Теплота спалювання газу, отриманого за технологією Siemens, менша, аніж за двома іншими технологіями, оскільки при газифікації пиловидного палива в потоці отримуваний газ розбавляється азотом, що використовується для подачі подрібненого вугілля до реактору. Зміни густини газу зумовлені в першу чергу вмістом в ньому найважливішого компонента – CO₂.

Технологія Техасо характеризується найбільшою продуктивністю промислово освоєних реакторів. Переробка 550 тис т вугілля на рік забезпечується одним робочим реактором продуктивністю за сировиною 75 т/годину. За технологією Lurgi потрібно два робочих реактори продуктивністю по 50 т/годину кожний.

За технологією Siemens достатній обсяг інформації є лише за реакторами продуктивністю 25 т/годину, які

експлуатувались протягом 25 років на комбінаті Schwarze Pumpe (східна Німеччина). Аналогічний реактор введений в експлуатацію 2008 р. на підприємстві в Суаз Vresova (чехія). Таких робочих реакторів для забезпечення заданої річної продуктивності за вугіллям потрібно три. Інформації про реактори продуктивністю 60 т/годину, передбачені для двох підприємств в Китаї, на даному етапі недостатньо для прийняття обґрунтованого рішення про застосування таких реакторів [8].

На підставі технологічних параметрів газифікації та аналізу джерел науково-технічної інформації була визначена потреба в енергоресурсах за використання різних технологій: питома (на тону вугілля, що переробляється), годинна (62,8 т/годину за вугіллям) та на весь річний випуск продукції. Ця потреба наведена в табл. 3.

Таблиця 3

Потреба в енергоресурсах

Ресурс, одиниця виміру	Lurgi			Siemens			Техасо		
	т	година	рік	т	година	рік	т	година	рік
Пара, т	0,44	27,6	242000	0,11	6,9	60500	-	-	-
Кисень, тис м ³	0,56	35,2	308072	0,85	53,4	467609	0,54	33,7	294869
Електроенергія, кВт·годин	42	2638	23105376	172	10802	94622016	125	7850	68766000
Вода, м ³ :									
Химочищена оборотна	0,44	27,6	242000	0,11	6,9	60500	0,33	20,7	181542
Технічна оборотна	1,26	79,1	693161	0,95	59,7	522622	0,33	20,7	181542
Забруднена оборотна	12	754	6601536	-	-	-	6,7	421	3685858
Забруднена	-	-	-	1,5	94,2	825192	1	62,8	550000

Витрати пари та кисню зумовлені технологічними параметрами газифікації. Мінімальна витрата електроенергії характерна для технології Lurgi як менш інтенсивної та яка потребує менших витрат на вуглепідготовку (не потрібне подрібнення вугілля). Найбільша витрата електроенергії – за технологією Siemens, де потрібна максимальна кількість кисню.

В технології Техасо хімічно очищена вода необхідна для живлення котлів-утилізаторів, в двох інших технологіях – для отримання пари для газифікації. Технічна оборотна вода необхідна в усіх технологіях для охолодження газу перед очищенням. Забруднена оборотна вода в технології Lurgi необхідна для зрошення колектору газу, що виходить з реакторів за температури 480 °С, а в технології Техасо – для зрошення скрубєрів, в яких охолоджується газ, що виходить з котлів-утилізаторів другого ступеня з температурою 300 °С. Безповоротна витрата забрудненої води необхідна в технології Техасо для приготування водовугільної пульпи, а в технології Siemens – для загартовування газу (охолодження його до 70 °С) в нижній частині реактору.

Обсяги отриманої супутньої продукції, кількість відходів виробництва та стічних вод зумовлені властивостями вихідної сировини та технологічними параметрами газифікації. Дані про ці обсяги наведені в табл. 4.

Технологія Техасо – єдина серед розглянутих, що дозволяє утилізувати тепло отриманого газу для отримання пари та електроенергії. Це дозволяє забезпечити своєю електроенергією принаймні значну частину потреб основного виробництва. Ця технологія не використовує пару, тому отримувана пара буде товарною продукцією.

В протиточній технології Lurgi частина тепла отриманого газу використовується для підігріву вихідного вугілля у верхніх шарах реактору. В технології Siemens все тепло отриманого газу безповоротно втрачається за його загартовування (охолодження циркулюючою водою) в нижній частині реактору. Необхідно зазначити, що прототипом цієї технології є технологія Гірничого бюро США, яка використовувалась в промисловості в 50-х р.р. минулого сторіччя [5]. В той же час сучасні технології газифікації вугілля в потоці (наприклад, варіант PSG технології PRENFLO [9]) передбачає вико-

ристання тепла отриманого газу в котлах-утилізаторах.

В процесі Lurgi утворюються помітні кількості соли внаслідок реакцій термічної деструкції без доступу повітря за достатньо тривалого знаходження вугілля у верхній частині реакторів. Як і в інших безперервних

процесах переробки вугілля (наприклад, виробництві формованого коксу), ця смола забруднена виносом твердофазного матеріалу, тому, незважаючи на свій малий ступінь піролізованості, характеризується підвищеними в'язкістю, густиною та вмістом нерозчинних речовин.

Таблиця 4

Обсяги отриманої супутної продукції, кількість відходів виробництва та стічних вод

Найменування, одиниця виміру	Lurgi			Siemens			Texaco		
	т	година	рік	т	година	рік	т	година	рік
Супутна продукція									
Електроенергія, кВт×годин	-	-	-	-	-	-	53,3	3348	29326054
Пара, т	-	-	-	-	-	-	0,33	20,7	181332
Смола, т	0,04	2,5	22000	-	-	-	-	-	-
Сірчана кислота, т	0,026	1,6	14080	0,026	1,6	14080	0,026	1,6	14080
Сульфат амонію, т	0,01	0,65	5700	0,01	0,65	5700	0,01	0,65	5700
Відходи									
Шлак т	0,14	8,74	76580	0,14	8,74	76580	0,14	8,74	76580
Стічна вода, м ³	0,25	15,5	135780	0,08	5,0	43780	-	-	-

Кількість отриманих сірчаної кислоти та сульфату амонію визначається ресурсами сірки та азоту у вихідному вугіллі. Приблизно 30 % отриманої сірчаної кислоти використовуватиметься за вловлювання аміаку, а решта (70 %) буде товарною продукцією.

Кількість утворюваного шлаку визначається в першу чергу зольністю вугілля. Для отримання шлаку в товарному вигляді за переробки тонкоподрібненого вугілля треба передбачити температуру газифікації вище температури плавлення золи, а також грануляцію шлаку.

Винос частини сировини з реакторів з утворюваним газом передбачається виділяти за очищення газу та повертати на газифікацію.

Кількість отриманих стічних вод визначали за балансом водню (різниця прибутку та витрати) в технологічному процесі. При цьому головними прибутковими статтями були: водень органічної маси вугілля, волога вугілля, кількість пари (води), що надходить на газифікацію. Витратними статтями були: водень в газі у вигляді простої речовини (H₂), у складі метану (CH₄) та у складі насичуючої газу водяної пари за температури після охолодження газу перед його очищенням.

Найбільша кількість стічних вод утворюється в процесі Lurgi через його малу інтенсивність та зумовлений цим низький ступінь розкладення пари (≈44 %). Стічні води утворюються також і в технології Siemens, хоча і в меншій кількості.

Технологія Texaco є дефіцитною за водою, оскільки частина води, що входить до складу пульпи, за газифікації розкладається. Тому для приготування пульпи потрібне безперервне підведення додаткової кількості

води. При цьому можливе використання води з органічними забрудниками (наприклад, господарсько-фекальної або утвореної за очищення газу). Зокрема, за створення потужностей з газифікації вугілля на коксохімічному підприємстві з цією метою планували використовувати надлишкову воду після аміачних колон виробництва коксу [10].

Висновки

1. Показані можливість та доцільність отримання синтез-газу та моторних палив на його основі з малометаморфованого кам'яного вугілля, запаси якого в Україні сягають 28 млрд т, що перевищує 60 % від загальної кількості наявних запасів. У якості сировинної бази в статті розглядається довгополум'яне вугілля Західного Донбасу, розташованого на території Дніпропетровської області, де діють потужні підприємства з видобутку та збагачення вугілля.

2. Найбільш розповсюдженими в світі технологіями газифікації вугілля є: процес Lurgi (протиточна парокиснева газифікація крупнокускового вугілля (або брикетів) в стаціонарному шарі), процес Siemens (прямоточна парокиснева газифікація в потоці пиловидного вугілля), процес Texaco (прямоточна киснева газифікація в потоці водовугільної пульпи).

3. На підставі проведених розрахунків для умов промислового підприємства потужністю за сировиною 550 тис т вугілля на рік для промислового впровадження рекомендовано процес Texaco. Перевагами цього процесу є відсутність стадії отримання пари для газифікації, дефіцитність водного циклу, що практично виключає утворення стічних вод та можливість викорис-

тання для газифікації забрудненої води з інших джерел; найбільший сумарний вміст в отриманому синтез-газу водню та оксиду вуглецю; максимальні освоєна потужність виробничих реакторів та найбільша кількість потужностей, які створюються в світі саме за цією технологією; утилізація тепла отриманого газу для отримання великої кількості електричної та теплової енергії.

4. Після створення та освоєння головної промислової установки з'явиться можливість тиражування технології в різних регіонах України для забезпечення господарських потреб в заміниках продуктів, отриманих наразі переробкою імпортованих нафти та природного газу.

Бібліографічний список

1. **Кизим М.О.** Техніко-економічні засади створення підгалузі з виробництва рідкого синтетичного палива в Україні / **М.О. Кизим, В.Є. Хаустова, В. В. Шнілевський та ін.** – Харків: ФОП Лібуркіна Л.М., 2022. – 212 с.

2. **Шульга І.В.** Перспективна сировинна база процесів виробництва синтетичного рідкого палива з українського вугілля / **І.В. Шульга, Є.І. Котляров, М.О. Кизим, В.Є. Хаустова** // Вуглехімічний журнал. 2023. № 5. С. 3-11. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-5-3-11>.

3. **Шульга І.В.** Хіміко-технологічна переробка вугілля різних регіонів України / **І.В. Шульга, В.І. Рудика, Д.В. Мірошніченко, А.О. Цимбал** // Енерготехнології

та ресурсозбереження. – 2019. – №3. – С. 7-15. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2019.01>.

4. **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>.

5. **Тютюнников Ю.Б.** Газифікація твердих палив / **Ю.Б. Тютюнников, М.С. Шептовицький, І.В. Шульга.** – Харків: ХДЕУ, 1994. – 64 с.

6. **Шульга І.В.** Газифікація твердих палив // Довідник коксохіміка. Т. 2. Розд. 20.2. – Харків: ВД «ІНЖЕК», 2014. – С. 697-715.

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

8. **Рудика В.І.** Перспективи виробництва синтетичного моторного палива в Україні. – Харків: ФОП Лібуркіна Л.М., 2017. – 152 с.

9. **Schellberg W.** The PRENFLO gasification process, design and materials experience / **W. Schellberg, N. Ullrich, W.T. Bakker, R.G.I. Leferink** // *Materials at High Temperatures*. 1997. – V. 14. – № 2. – P. 159-163. <https://doi.org/10.1080/09603409.1997.11689540>.

10. **Шульга І.В.** Розвиток хіміко-технологічних процесів переробки вугілля / **І.В. Шульга** // Вуглехімічний журнал. – 2015. – № 3. – С. 21 - 31.

Рукопис надійшов до редакції 02.07.2024

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-5-13-20

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

PRODUCTION OF SYNTHETIC MOTOR FUEL FROM HARD COAL USING VARIOUS GASIFICATION METHODS

© **E.I. Kotlyarov**, Ph.D. in economics (Scientific Research Centre for Industrial Problems of Development of the National Academy of Sciences of Ukraine (SRC for IPD of NASU), 1a Inzhenernyi lane, Kharkiv, 61166, Ukraine), **I.V. Shulga**, Ph.D. in technical sciences (State Enterprise “Ukrainian State Research Institute for Carbochemistry (UKHIN)”, 7 Vesnina str., Kharkiv, 61023, Ukraine), **M.O. Kyzym**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Economics, **V.E. Haustova**, Doctor of Economics (SRC for IPD of NASU)

The purpose of the article is to assess the feasibility of organising the production of synthesis gas from low-metamorphosed hard coal, the reserves of which in Ukraine reach 28 billion tonnes, which exceeds 60 % of the total available reserves. As a raw material base, the article considers the long-burning coal of Western Donbas, located in the Dnipro region, where powerful coal mining and enrichment enterprises operate.

To achieve this goal, we analysed the world's most common coal gasification technologies: the Lurgi process (countercurrent steam-oxygen gasification of coarse coal (or briquettes) in a stationary bed), the Siemens process (direct-flow steam-oxygen gasification in a pulverised coal stream), and the Texaco process (direct-flow oxygen gasification in a water-coal pulp stream).

For each of these processes, material balances were developed, the quality of the synthesis gas produced, the possibility of organising the production of the necessary energy resources, the level of emissions of harmful substances into the atmosphere, and the main technical and economic indicators were assessed. The calculations were performed for an enterprise with a coal capacity of 550 thousand tonnes of working weight per year.



Based on the calculations, the Texaco process is recommended for industrial implementation. The advantages of this process are the absence of a stage of steam production for gasification, the scarcity of the water cycle, which virtually eliminates the formation of wastewater and the possibility of using contaminated water from other sources for gasification; the highest total content of hydrogen and carbon monoxide in the synthesis gas produced; the maximum utilised capacity of production reactors and the largest number of capacities created in the world using this technology; utilisation of the heat of the gas produced to generate a large amount of electricity and heat.

Keywords: hard coal, Western Donbas, gasification processes, gasification indicators, synthetic motor fuel.

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

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-5-20-28

Спеціальність 161. УДК 662.74:66.092 + 553.93

ПЕРСПЕКТИВИ ТЕРМОХІМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ СОЛОНОГО ВУГІЛЛЯ УКРАЇНИ

© Д.В. Брик¹, Д.З. Кульчицька-Жигайло², О.В. Гвоздевич³, Ю.Я. Герльовський⁴

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

¹ Брик Дмитро Васильович, докт. техн. наук, с.н.с., зав. віділу проблем геотехнології горючих копалин (ВПГГК), e-mail: dmytrobryk@ukr.net

² Кульчицька-Жигайло Леся Зиновіївна, мл. наук. співр. ВПГГК, e-mail: igggk@mail.lviv.ua

³ Гвоздевич Олег Васильович, мл. наук. співр. ВПГГК, e-mail: igggk@mail.lviv.ua

⁴ Герльовський Юрій Ярославович, інж. першої категорії ВПГГК, e-mail: igggk@mail.lviv.ua

У статті показано, що необхідність всебічного вивчення солоного вугілля значною мірою визначається технологічними завданнями використання його для енергетичних цілей. При спалюванні солоного вугілля (СВ) відбувається шлакування котлів з подальшим руйнування металевих частин і теплоізоляційних карборундових матеріалів. З досвіду спалювання солоного вугілля відомо, що присутність натрію у вугіллі призводить до зниження температури шлакування 750-850 °С. Також при спалюванні СВ відбувається конденсація натрію на стінках трубопроводів і теплообмінних поверхнях. Сформульовано конкретні характеристики СВ, від якого залежить його термохімічна переробка. Показано, що наразі для використання СВ в різних країнах пропонується спалювати його разом з іншим вугіллям; розглянуто можливості створення нового обладнання і реконструкції діючих котельних установок для спалювання вугілля без попередньої очистки. Зазначено, що вивчалось також використання різних флюсів та порід, які містять каолін, розроблялися методи газифікації солоного вугілля.

Приділено увагу розробкам Інституту геології і геохімії горючих копалин НАН України (м. Львів), де створена стендова установка для дослідження процесів термохімічної переробки кускового вугілля. Перспективним процесом термохімічної конверсії солоного вугілля можуть бути також розроблені в Інституті та запатентовані способи газифікації водовугільної пульпи, при якій відбувається як вимивання натрію на початковій стадії процесу при введенні пульпи в реактор, так і його швидкий перехід у водно-паровий екстракт безпосередньо при високотемпературному процесі газифікації пульпи.

У статті наведено запатентовані ІГГГК НАН України принципові технологічні схеми способу конверсії СВ, зокрема термохімічної переробки водовугільної пульпи солоного вугілля. Крім наземної переробки СВ, родовища солоного вугілля можуть бути придатними для використання технології його підземної газифікації.

Визначено, що найбільш перспективними напрямками термохімічної конверсії солоного вугілля будуть газифікація водовугільної пульпи та процеси підземної газифікації. Тому проблема солоного вугілля потребує подальших наукових досліджень.

Ключові слова: солоное вугілля, термохімічна переробка, вугільна пульпа, підземна газифікація вугілля.

Автор для листування Д.В. Брик, e-mail: dmytrobryk@ukr.net

Розвиток енергетики вимагає залучення до паливно-енергетичного комплексу України нових родовищ вугілля, які до цього часу не розроблялися у зв'язку зі специфічними властивостями мінеральної частини вугілля. До такого вугілля відноситься так зване солоное вугілля (СВ), тобто, вугілля з підвищеним вмістом в ньому сполук натрію і хлору. В Україні розвідано значні запаси солоного вугілля, які складають близько 12 млрд. т, частина з них зосереджена в родовищах Донбасу (Дніпропетровська, Кіровоградська, Полтавська області). Проте зауважимо, що єдиного критерію визначення, яке вугілля вважають «солоним», не існує. Так, у США «солоним» вугіллям вважають таке, що містить у золі масову частку оксиду натрію понад 4 %, в той час як у Німеччині – понад 2 %. У Великій Британії та Австралії прийнято використовувати два критерії значення цього показника: 4-5 % в золі і 1 % у сухому вугіллі. В Україні (Інститут геологічних наук НАН України) гранична масова частка оксиду натрію становить 5,5 % в золі, а в Інституті фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л.М. Литвиненка запропоновано відносити вугілля до солоного з урахуванням лише вмісту легкоплавких сполук натрію [1].

Вугілля майже завжди містить певну кількість хлору, концентрація якого змінюється від 0,005 до 1,2 %. Вугілля, яке містить сполуки лужних металів, називають «засоленим», «солоним», «з підвищеною солоністю» та ін. Найбільш поширений термін «солоне вугілля». До нього відносять вугілля, яке містить натрій і хлор в кількостях, більших за певні норми. Однак загальноновизнаних критеріїв віднесення вугілля до солоного немає. Солоним прийнято вважати вугілля, що містить більше 0,6 % водорозчинних лужних компонентів, а хлору більше 0,5 %. Наприклад, у вугіллі Старобільського родовища з вмістом 0,3 % Na₂O, хлор не виявлений. В золі вугілля Петриківського родовища вміст лужних металів сумарно складає 4,8-11,0 %. Вугілля Na₂O та 1,6 % хлору [2].

Основним джерелом хлору і натрію у вугіллі найімовірніше є багата розчинними лужними хлоридами морська вода, з якою пласти колись знаходились в контакт. Існує багато теорій відносно з'єднань натрію і хлору у вугіллі. Вважається, що близько 50 % натрію у вугіллі знаходиться у виді катіонів, зв'язаних з вугільною речовиною через кислотні карбоксильні групи. Решта натрію з'єднана з хлором, а частина хлору міститься у вигляді органічних з'єднань іонів хлоридів.

Необхідність всебічного вивчення солоного вугілля в значній мірі визначається технологічними завданнями використання його для енергетичних цілей, які є складними з технологічної та екологічної точки зору [3]. При його спалюванні відбувається шлакування парових котлів з подальшим руйнування металевих частин і теплоізоляційних карборундових матеріалів в зв'язку з високою корозійною активністю солоного вугілля (підвищений вміст натрію і хлору). Інтенсивному зниженню температури шлакування до 750-850 °С (що значно нижче температури шлакування освоєного вугілля – 1000-1050 °С) сприяє хлористий натрій, а хлориди лужноземельних металів, що присутні в паливі, викликають додаткову високотемпературну корозію металевих та теплоізоляційних частин обладнання. В солоному вугіллі натрій практично рівномірно розподілений по органічній речовині [4] і легко випаровується в камері топки. Потому, конденсуючись на поверхні нагріву і частинках золи, сполуки натрію створюють на них липку плівку, що сприяє зв'язуванню відкладень. Залишковий натрій в розплаві знижує в'язкість останнього, що призводить до зниження температури початку шлакування. Обидва явища стрімко збільшують схильність такого виду палива до шлакування.

Досвід використання солоного вугілля, накопичений за кордоном і в Україні, передбачає його переробку в процесі попередньої газифікації, знесолення йодидом, промивання водою, сумісне спалювання з більш «чистим» паливом, перевід шкідливих домішок в тугоплавкі сполуки при введенні присадок магнію і калію [5-7]. В Німеччині при спробі освоїти процес спалювання солоного вугілля був висунутий принцип так званого «холодного горіння», який полягає у спалюванні палива при температурі факелу не вище 1000 °С для можливого зменшення випаровування лужних компонентів золи. Оскільки зниження температури спалювання вугілля до 700-800 °С вимагає використання високоефективних дорогих каталізаторів [6], то високотемпературна (900-1000 °С) газифікація є більш реальним шляхом переробки солоного вугілля. Варто зазначити, що завдяки високому вмісту водню в газі (при

умові відмивання діоксиду вуглецю, що не є технологічно складним) таким шляхом може бути отримано досить чисте екологічне паливо [7]. Однак забруднення камери топки при спалюванні СВ у цьому випадку буде значно більшим, ніж при спалюванні звичайного вугілля. Це дає підставу стверджувати, що сучасні котли наразі не пристосовані для спалювання солоного вугілля.

Розглянемо детальніше корозійну дію солоного вугілля на обладнання. З досвіду спалювання солоного вугілля відомо, що присутність натрію у вугіллі призводить до зниження температури шлакування. Крім цього, при спалюванні СВ відбувається конденсація натрію на стінках трубопроводів і теплообмінних поверхнях. При цьому утворюються первинні відкладення, на яких відбувається подальше налипання золи, що призводить до різкого погіршення умов теплообміну. Як свідчить фактичний матеріал, найнебезпечнішими за наслідками є лужні метали, не зв'язані в алюмосилікати, а власне натрій. Калій майже повністю зв'язаний з тугоплавкими силікатами, які не розчинні у воді і не сублимуються при спалюванні вугілля, а натрій може знаходитися в складі легкоплавких сполук, зокрема галіту, температура плавлення якого складає 800 °C [1, 8].

Наявність в солоному вугіллі хлору і сірки сприяє збільшенню швидкості корозії, при цьому у відновному середовищі корозія посилюється з ростом вмісту сірки і призводить до сульфідної корозії. Аналогічні явища можуть спостерігатися при газифікації солоного вугілля. Хлориди є більш летючими, ніж сульфати, однак відносно температури їх сублимації дослідники поки не прийшли до однозначного висновку, тому що вона змінюється під впливом багатьох фізико-хімічних параметрів [9]. За високих температур в топці хлористий натрій, що знаходиться в твердому паливі, майже повністю сублимує і в присутності оксидів сірки утворює сульфат натрію. Хлористий натрій, що не встиг прореагувати, та частина сульфату натрію в пароподібному стані будуть конденсуватися на екранних та ширмових поверхнях нагріву, а також на частинках летючої золи, збільшуючи їх липкість. Прилипання зольних частинок визначається не тільки наявністю силових полів поверхневих атомів, але і зменшенням в'язкості золи, що знижує температуру початку шлакування. Зокрема, для вугілля Новомосковського родовища Західного Донбасу вона складає (при зольності 7,6 і 12 %) 750-780 °C, що значно нижче температури шлакування освоєного вугілля Донбасу (1000-1050 °C).

Крім інтенсивного утворення відкладень золи на поверхнях нагріву та їх зашлакування, солоне вугілля викликає значну корозію металів, швидкість якої збільшується з ростом температури металу і вмісту хлористого натрію в паливі. Під впливом хлоридів знижуються захисні властивості оксидних плівок, важливими

компонентами котрих в аустенітних сталях є карбід і оксид калію. В контакт з хлоридами відбувається руйнування оксидних плівок, що потрібно враховувати при виборі методів очистки високотемпературних поверхонь нагріву, використовуючи способи, які не порушували б захисних властивостей оксидних плівок.

Сполуки хлору – активний прискорювач високотемпературної корозії навіть при вмісті його менше 0,4 %. Небезпечною є наявність хлору в паливі в кількостях більших від 0,5 %. Корозійна активність хлоридів спостерігається, починаючи з температури 400 °C і збільшується у відновному середовищі [10].

Значне прискорення корозії сталі при наявності в мінеральній частині вугілля лужних металів пояснюється утворенням складних сульфатів натрію і калію, які плавляться при низьких температурах [11]. Сполуки лужних металів, що містяться в паливі, незалежно від їх кількості агресивно впливають на карборундову теплоізоляцію труб. Передбачається, що в цьому відношенні важливий не стільки абсолютний вміст шкідливих домішок в паливі або золі, скільки їх наявність.

Аналіз способів використання засоленого вугілля. Над проблемою використання солоного вугілля працювали вчені Лісснер Ф., Леман Г., Скиле Е., Кроунголд Г., Сондріл Е., Рамлер Е., Білецький В., Кривега Г., Іванова А., Пожидаєв С., Бойко З., Фоменко О., Саранчук В., Круть О., Дунаєвська Н., Шендрік Т. та інші вчені. В роботі [1] показані перспективи використання солоного вугілля в Україні.

В Німеччині вугілля з високим вмістом натрію в золі пробували спалювати в шихті, до складу якої входила глина; в Англії при спалюванні вугілля з вмістом хлору більше 0,5 % додавали каолін. При цьому у вугіллі зменшувалася концентрація шкідливих домішок, які частково переводилися в тугоплавкі алюмосилікати, що не підлягають сублимації при температурах в топці. Однак ці способи є економічно не вигідними через значне зменшення теплотворної здатності палива. Крім того, використання присадок не усуває повністю корозійної дії солоного вугілля на метал та теплоізоляційні матеріали. Згодом в Німеччині пішли шляхом розробки і створення котлоагрегатів, конструкція яких відповідає спеціальним умовам. Передбачалося застосування лоткових колосникових решіток, що вздовж обмиваються димовими газами поверхонь нагріву вільно підвішених пакетів з труб малого діаметру. Їх можна очищати, не зупиняючи роботу котла, з використанням ударних пристроїв або шляхом гідравлічного золовидалення, і підтримання певного температурного режиму, що забезпечує продуктивну роботу котла. У відповідності до цих вимог було створено агрегати середньої продуктивності, де спалювалося буре вугілля з вмістом хлору в рядовому вугіллі до 0,7-1,0 %. У зв'язку з сильним забрудненням труб конвективних пароперегрівачів

вони були зупинені, реконструйовані та переведені на спалювання звичайного кондиційного вугілля.

Ф. Лісснер та ін. [12] рекомендують для використання солоного вугілля в котлах низької продуктивності з шаровим спалюванням застосовувати напівгазову топку з оберненою подачею димового газу і введенням в нього водяної пари. Однак принцип напівгазової топки з рециркуляцією димового газу не підходить для топкоз пилувидним спалюванням палива. Основна перешкода використання солоного вугілля в котлоагрегатах великої потужності з пилувугільними топками – виникнення високих температур в камерах топки, що спричиняє сублімацію хлоридів вугілля. Тому виникла необхідність створення нових конструкцій топкоз так званого холодного горіння. В котлі такої конструкції, крім застосування в зоні високих температур руху газу вздовж поверхонь нагріву, що обмиваються, і які характеризуються більш низькими швидкостями утворення відкладів, передбачалися також спалювання палива при максимально низькій температурі і максимально швидке зниження температури газів для запобігання спіканню відкладень золи. Виготовлений відповідно до цих вимог котел не дав позитивних результатів, і подальші роботи з освоєння солоного вугілля в Німеччині були призупинені.

Солоне вугілля досліджувалося також з точки зору здатності його до брикетування та можливості спалювання у великих котлоагрегатах. В результаті дослідники прийшли до висновку, що через значний вміст гуматів кальцію і натрію брикети мають низьку водостійкість. Крім того, здатність до брикетування погіршується з підвищенням сірчистості.

У США солоне вугілля спалювали в спеціально сконструйованих агрегатах, які мають визначені розміри топки, положення поверхонь нагріву, велику кількість апаратів для парової очистки екранів, тощо. Як відзначає Г. Гренховд [13], на одному з блоків електростанції для спалювання низькосортних лігнітів Північної Дакоти та Техасу було встановлено 252 апарати продування. Іноді значного ефекту для видалення золи і шлаку з екранів топки можна досягнути шляхом використання в апаратах продувки води замість водяної пари, але цей спосіб не підходить для очистки поверхонь паронагрівачів через виникнення термічної напруги в трубах.

Складності, які не можна подолати шляхом конструкторських рішень, викликають необхідність пошуку нових способів знесолення вугілля. Згідно даних Г. Гренховда, єдиним відомим методом видалення натрію з вугілля є іонообмін, який є економічно не вигідним і тому не застосовується в промисловості.

Перспективним є отримання з солоного вугілля синтетичного рідкого палива, яке можна продукувати шляхом каталітичної деструктивної гідрогенізації під дією газоподібного водню та термічного розчинення під тиском водню або в присутності розчинника – донора

водню, гідропіролізу вугілля та його газифікації з подальшим синтезом рідких продуктів з синтез-газу за методом Фішера-Тропша. Не виключено, що в процесі гідрогенізації натрій буде заміщений воднем, в результаті чого отриманий твердий продукт можна використовувати як паливо на ТЕС.

У багатьох країнах світу проводяться дослідження зі спалювання низькосортного палива в установках, де створюються умови продування шару вугілля повітрям. У деяких країнах для спалювання низькометаморфзованого вугілля зі значним вмістом золи і сірки вводяться в експлуатацію досить економічні парогазові установки з внутрішньоцикловою газифікацією вугілля в киплячому шарі на пароповітряному дутті під тиском. Газифікація в них проходить зазвичай при температурах нижче сублімації хлористого натрію. Відповідно, при використанні в таких установках солоного вугілля шлак буде мати легкоплавкі сполуки натрію, що містяться у вугіллі, і при подальшому випалі зі шлаку горючих компонентів ці сполуки будуть сублімувати в зоні агломерації з відповідними негативними наслідками. Поряд з цим у США для спалювання сірчистого вугілля низької якості використовуються установки, що імітують умови аерованого шару, в котрих використовується подрібнений вапняк. Його використання дає можливість видалити з газу, що утворюється при згорянні, діоксид сірки, який легко поглинається вапняком при порівняно невисоких температурах в зоні горіння (приблизно 815-870 °C). Додавання хлористого натрію у вапняк при його кальцинуванні або (у вигляді пари) у середовище, де спалюється вугілля, зменшує витрати вапняку більш ніж на 50 %. Лабораторними дослідженнями встановлено механізм дії солі на вапняк. Порівняння внутрішньої мікроструктури вапняку, що був кальцинований без додавання NaCl, зі структурою вапняку з NaCl [14] свідчить, що сіль при кальцинуванні змінює внутрішню мікроструктуру вапняку та супроводжується переходом мікропор у макропори. В результаті краще відбувається дифузія сірчистого ангідриду, а поглинання його вапняком значно збільшується. Чітких доказів корозійної активності солі, що вводиться, не існує. Кількість солі, яка є необхідною для проведення цього процесу, складає приблизно 1 % від ваги палива і є співрозмірною з вмістом хлористого натрію в солоному вугіллі. Звідси можна зробити логічний висновок, що запропонований спосіб спалювання низькосортного палива з використанням вапняку як наповнювача слід випробувати на солоному вугіллі. Можливим є також використання такого вугілля на теплових електростанціях з магнітогідродинамічними (МГД) генераторами.

Численними дослідженнями щодо використання солоного вугілля в промисловості (термохімічна переробка) встановлено, що ефективного способу наземної переробки СВ на даний час не знайдено [3]. Заслуговує

на увагу спосіб з демінералізації солоного вугілля, описаний в роботі [15].

Термохімічну переробку солоного вугілля проводять, виходячи з його конкретних характеристик. Для використання СВ пропонується його спалювати разом з іншим вугіллям, розглядаються також можливості створення нового обладнання і реконструкції діючих котельних установок для спалювання вугілля без попередньої очистки. Наприклад, для більш солоного вугілля Новомосковського родовища здійснювалися пошуки шляхів зв'язування натрію в топці шляхом переведу його в тугоплавкі сполуки. Для цього передбачалося використання різних флюсів та порід, які містять каолін. Досліджувалася також можливість отримання облагороджених палив шляхом напівкоксування та вивчалися можливі галузі використання продуктів, що утворюються в результаті цього процесу (напівкокс, газ та смоли). В ІПТГК НАН України Я. Сидоровичем розроблялися методи газифікації солоного вугілля [16].

Відомі способи збагачення солоного вугілля шляхом промивання водою в стаціонарних умовах та можливість суміщення процесів знесолення і гідротранспортування вугілля по трубопроводах. У наземних умовах дослідження показали можливість застосування цього методу на практиці. Для виявлення можливості знесолення вугілля шляхом промивання водою визначають кількість натрію, що вимивається, та швидкість його переходу у водний екстракт в залежності від фракційного складу вугілля і співвідношення вугілля-вода. Проте при цьому виникає додаткова екологічна проблема – утилізації високомінералізованої води, що отримується при знесоленні. Опріснення солоної води, виділеної з пульпи, вимагає проведення спеціальних заходів, оскільки отримання прісної води повинно поєднуватися з концентруванням розсолу, що утворюється, виділенням з нього солі і доведенням до якісних показників товарної продукції. Тому для успішного вирішення екологічної проблеми потрібно створення замкненої безстічної системи знесолення, що є досить актуальним в умовах дефіциту водних ресурсів в Україні [3].

Таким чином, дослідження використання солоного вугілля не дають можливості остаточно визначити доцільність та наслідки його безпосереднього спалювання в суміші з іншим вугіллям або флюсами, а також в котлоагрегатах спеціальної конструкції. Тому слід продовжувати подібні дослідження для виявлення можливості спалювання вугілля з мінеральними добавками з метою переведу натрію в тугоплавкі алюмосилікати. З цієї точки зору необхідно вивчати склад вміщуючих порід.

Заслужують на увагу розробки Інституту геології і геохімії горючих копалин НАН України (м. Львів), де створена стендова установка для дослідження процесів термохімічної переробки кускового вугілля. Перспек-

тивним процесом термохімічної конверсії солоного вугілля можуть бути також розроблені в Інституті та запатентовані способи газифікації водовугільної пульпи, при якій відбувається вимивання натрію як на початковій стадії процесу при введенні пульпи в реактор, так і його швидкий перехід у воднопаровий екстракт безпосередньо при високотемпературному процесі газифікації пульпи [17].

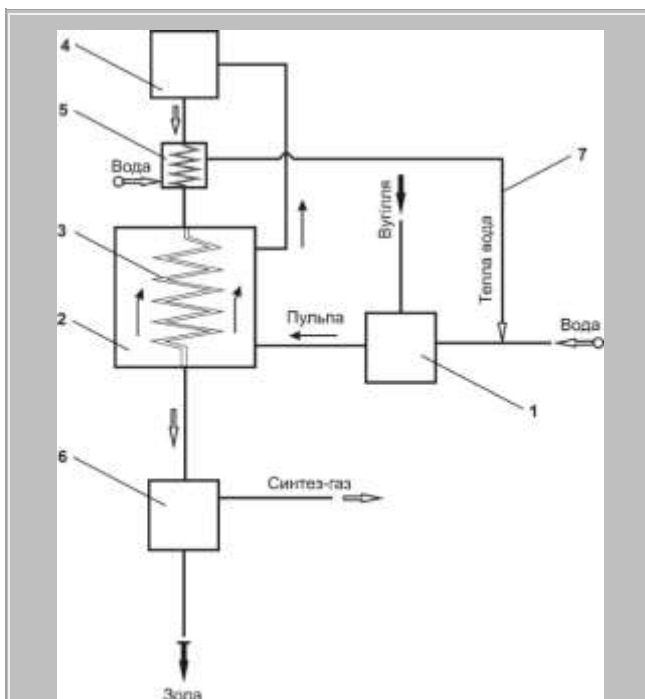


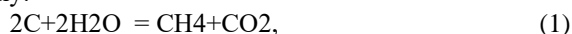
Рис. 1 Блок-схема способу термохімічної переробки водовугільної пульпи солоного вугілля:

1 – вузол приготування вугільної пульпи; 2 – рекуператор; 3 – газохід; 4 – реактор-газифікатор; 5 – водяний теплообмінник; 6 – вузол для очистки газів; 7 – технологічна лінія для відведення теплої води

Розглянемо деякі способи термохімічної конверсії вугілля з використанням водовугільної пульпи. На рис. 1 зображено принципову технологічну схему способу конверсії СВ – термохімічної переробки водовугільної пульпи солоного вугілля. Схема містить вузол 1 для приготування водовугільної пульпи солоного вугілля відповідного співвідношення C:H₂O, рекуператор 2, в який вміщено трубчатий елемент – газохід 3. У верхній частині рекуператора 2 розміщений реактор-газифікатор 4, нижче реакційної зони якого у протиточному водяному теплообміннику 5 проводять різке охолодження – «гартування» утвореного синтез-газу, а у нижній частині рекуператора 2 – вузол 6 для очистки газів. Технологічна лінія 7 слугує для відведення теплої

води з теплообмінника 5 і подачі її у вузол 1 приготування пульпи.

Пропонований спосіб реалізують наступним чином. Вугільну пульпу солоного вугілля (шлам дрібного СВ з водою у співвідношенні 1:1), яка приготовлена у вузлі 1, подають в рекуператор 2, а далі – в реактор-газифікатор 4, у якому в залежності від термобаричних параметрів проходять хімічні реакції з утворенням метану:



або – з утворенням «синтез-газу»:

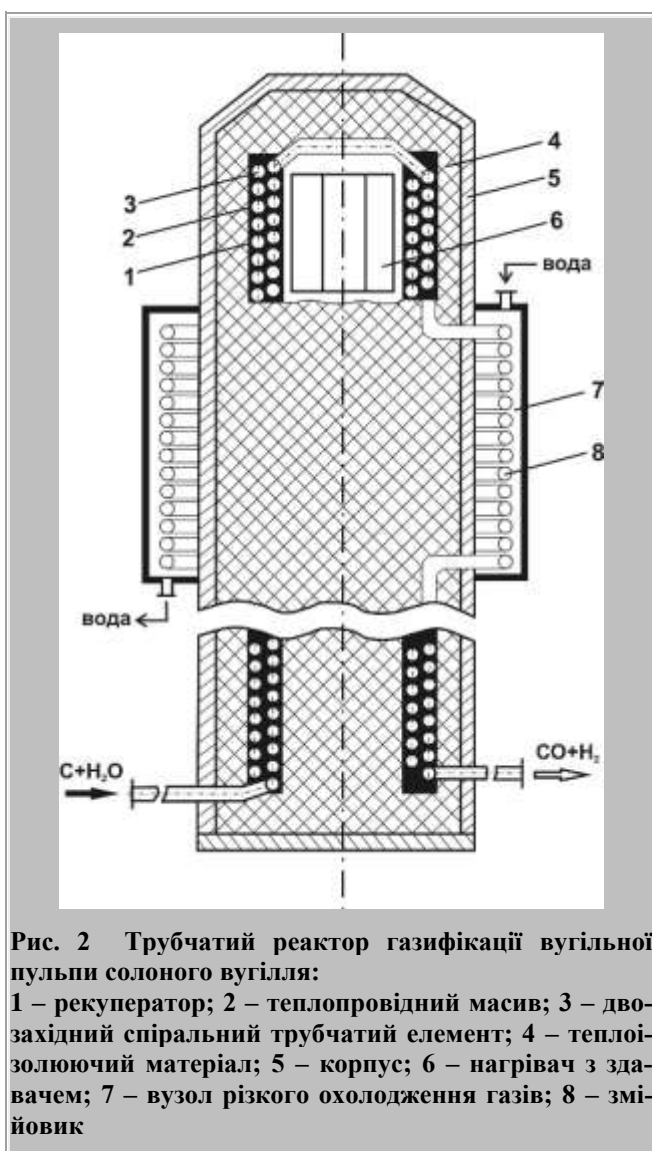


Рис. 2 Трубчатий реактор газифікації вугільної пульпи солоного вугілля:

1 – рекуператор; 2 – теплопровідний масив; 3 – дво-західний спіральний трубчатий елемент; 4 – теплоізолюючий матеріал; 5 – корпус; 6 – нагрівач з здавачем; 7 – вузол різкого охолодження газів; 8 – змійовик

Після виходу газів із зони реакції синтез-газ подають у протиточний водяний теплообмінник 5, де проводять «гартування» утвореного синтез-газу для стабілізації його складу. Далі загартований газ через трубча-

тий елемент (газохід 3) поступає в рекуператор 2, нагріваючи у ньому водовугільну пульпу, яка у підігрітому стані вводиться в зону реакції газифікатора 4. З камери гартування теплообмінника 5 підігріта газом вода по технологічній лінії 7 поступає регульовано у вузол 1 приготування водовугільної пульпи.

Таким чином, «гартування» (різке охолодження) синтетичних газів підвищує ефективність реактора через запобігання деструкції компонентів газу, завдяки чому досягається вища стабілізація його складу. Крім того, у пропонованому способі одночасно проводять попередній підігрів водовугільної пульпи, що дозволяє зекономити теплову енергію для протікання реакції та підвищити енергоефективність процесу.

На рис. 2 схематично зображено трубчатий реактор (розріз) для газифікації вугільної пульпи солоного вугілля [17].

Трубчатий реактор для газифікації вугільної пульпи СВ працює наступним чином. Вугільну пульпу при заданому високому тиску подають в зону рекуперації 1, у якій у дво-західному спіральному трубчатому елементі 3 проходить хімічна реакція ($2C+2H_2O = CH_4+CO_2 - 93$ кДж/моль), наприклад при температурі 1000 0С та тиску 40 МПа. Температура в зоні реакції підтримується за допомогою теплокомпенсуючого елемента 6. Після виходу газів із зони реакції їх подають через газовідвідний змійовик 3 у вузол 7 гартування, який змонтований навколо корпусу 5. У теплообміннику 7 різко охолоджують водою змійовик 3 з отриманими газами.

На рис. 3 схематично зображено одну із технологічних схем реалізації способу комплексної наземної термохімічної переробки вугілля у вигляді пульпи СВ [17], що містить трубчатий реактор 1 для отримання водневмісного синтез-газу $CO+H_2$, лінії розділення потоків 2 водневмісного газу, вертикальний шахтний реактор-газифікатор 3 кускового вугілля, у якому розміщені два перфоровані колектори для подачі синтез-газу, причому один із колекторів 4 розміщений вище зони горіння 5, яка створена у середній частині реактора 3 та вище зони піролізу 6, а інший 7 – нижче зони 5. Перфорований колектор 8 розміщений нижче зони 6 піролізу вугілля і слугує для відведення газових смоляних продуктів через теплообмінник і сепаратор смоли. Колектор 7 слугує для подачі у реактор 3 нижче зони горіння 5 іншої частини $CO+H_2$, а колектор 8, який розміщений теж нижче зони 5, але над колектором 7 – для відведення газу, який збагачений метаном. Пропонований спосіб охоплює дві стадії. Перша стадія – отримання водневмісного синтез-газу $CO+H_2$ з водовугільної пульпи у трубчастому реакторі 1, друга стадія – введення частини отриманого газу у вертикальний шахтний реактор-газифікатор 3 кускового СВ для отримання смоли та збагаченого метаном газу.

На першій стадії вугільну пульпу солоного вугілля подають в трубчастий реактор 1, у якому в залежності

від термобаричних параметрів проходять хімічні реакції з утворенням водневмісного газу, який на виході після «гартування» відбирають для цільового використання, а іншу його частину розділяють на два потоки 2 та направляють у вертикальний шахтний газифікатор 3 кускового вугілля. У реакторі-газифікаторі 3 процес горіння організовують таким чином, що зону горіння 5 з температурою $T_1 = 850 - 900$ °С створюють у середній частині реактора 3, вище якої існує зона 6 піролізу з температурою $T_2 = 400 - 450$ °С. Далі один потік

$\text{CO} + \text{H}_2$ рівномірно подають через перфорований колектор 4 вище зони 6 піролізу, у якій утворюються парогазові смоляні продукти, збагачені CO та H_2 . Парогазові смоляні продукти відводять через колектор 8, а далі через теплообмінник і сепаратор смоли. При такому «збагаченні» отримують якісніший склад вугільної смоли для подальшого виробництва паливних та паливно-мастильних продуктів завдяки присутності в отриманій смолі більшої кількості низькомолекулярних фракцій та зменшенню вмісту ароматичних вуглеводнів.

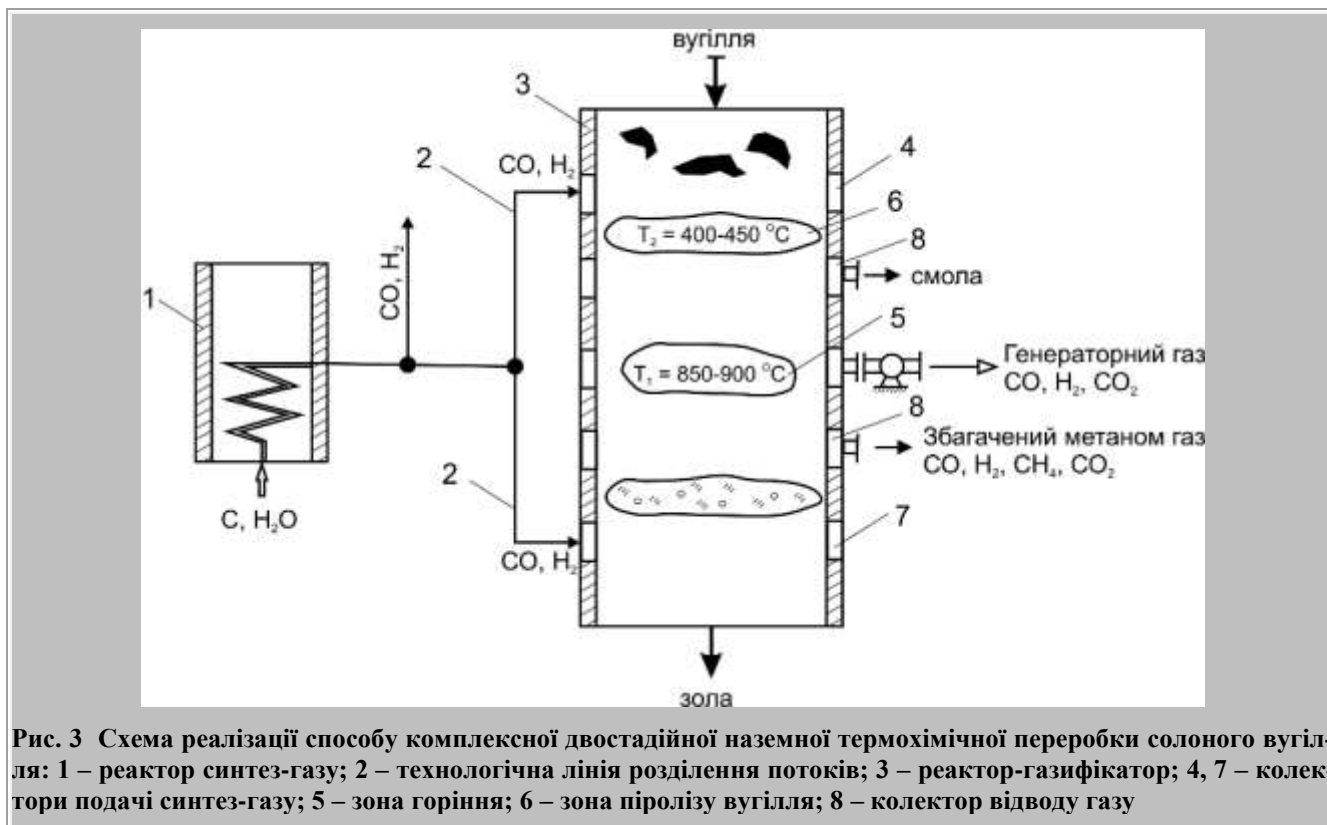


Рис. 3 Схема реалізації способу комплексної двостадійної наземної термохімічної переробки соляного вугілля: 1 – реактор синтезу газу; 2 – технологічна лінія розділення потоків; 3 – реактор-газифікатор; 4, 7 – колектори подачі синтез-газу; 5 – зона горіння; 6 – зона піролізу вугілля; 8 – колектор відводу газу

Крім того, другий потік 2 водневмісного газу подають через колектор 7 зону розжареного до температури $850 - 900$ °С вугілля, у якій з C , CO , H_2 при певних термобаричних умовах відбувається синтез газу з підвищеним вмістом метану. Збагачений метаном газ відводять через колектор 8 для споживача, або домішують його частину до газу, який отримують із середньої частини шахтного реактора-газифікатора 3. При цьому частину збагаченого метаном газу можна вводити додатково до потоків 2 для стимулювання процесу отримання більш якісного складу цільової смоли.

Таким чином, комплексна наземна термохімічна переробка СВ підвищує ефективність процесу за рахунок отримання якісного складу вугільної смоли для подальшого виробництва палива та паливно-мастильних продуктів завдяки присутності в отриманій смолі біль-

шої концентрації широкої бензинової, керосинової та дизельної фракцій та зменшенню кількості ароматичних вуглеводнів. Крім того, у запропонованому комплексному двостадійному способі відсутні негативні процеси шлакування СВ. Одночасне отримання технологічних і енергетичних газів та первинної смоли підвищують ефективність процесу.

Слід зауважити, що крім наземної переробки СВ родовища соляного вугілля можуть бути придатними для їх використання у технології підземної газифікації. Це технологія, де будуть відсутні: будівництво вартісних копалень, важка і небезпечна праця шахтарів, утворення екологічно небезпечних об'єктів (териконів пустої породи), відходів від спалювання такого вугілля у котлах теплових підприємств, процесу знесолення вугілля водою, а також відсутність подрібнення вугілля, тощо.

Розпал вугілля на вибої газувидної свердловини відбувається подачею на вибій дугтевої свердловини газифікуючого агента, в якості якого використовують переважно повітря. Відбір генераторного газу (з температурою близько 1000 °С) здійснюють через газувидну свердловину, попередньо здійснивши його різке охолодження до температури стабілізації горючих компонентів цільового газу [18]. Гірничо-геологічні умови, висока теплота згорання (близько 28 МДж/кг), невисока зольність (близько 10 %) сприяють проведенню процесу газифікації на місці залягання пластів солоного вугілля. При цьому зашлаковування підземного генератора частково погіршує теплообмін та умови проведення процесу газифікації, але в кінцевому результаті, на відміну від наземного генератора, не призводить до виходу його з ладу і затухання процесу. Для успішного вирішення проблем термічної переробки в пластових умовах СВ необхідно розробити засади і геотехнологічні способи підземної газифікації солоного вугілля, які б усували або зменшували наступні недоліки, характерні для підземної газифікації солоного вугілля: значна корозійна активність цільових газів, що отримуються в процесі та відводяться на поверхню, котра спричинює швидкий вихід з ладу газувидної неізольованої внутрішньої поверхні сталевої свердловини; необхідність проведення процесу при нижчих (900-950 °С) температурах, які не повинні істотно перевищувати рівень, котрий сприяє утворенню рідкого шлаку. Варто більш детально вивчити придатність українських родовищ солоного вугілля для проведення процесу підземної газифікації. Технологія підземної газифікації заслуговує на увагу як перспективний напрям використання хлор-натрій-вмісного вугілля шляхом термохімічної переробки в умовах вугільного пласта з отриманням енергетичних і технологічних газів.

Висновки

З викладеного вище випливає, що на сьогодні не запропоновано ефективних технологічних рішень використання у промислових масштабах некондиційного солоного вугілля – ні шляхом знесолення, ні термічною переробкою (спалювання в котлах, газифікації в наземних або підземних умовах). На наш погляд, найбільш перспективними напрямками термохімічної конверсії солоного вугілля можуть бути газифікація водовугільної пульпи та процеси підземної газифікації. Проблема солоного вугілля потребує подальших наукових досліджень.

Бібліографічний список

1. **Biletskyi V.** *Technological and environmental aspects of Ukrainian salty coal development* / V. Biletskyi // *Mining of Mineral Deposits*. – 2014. – № 4. – P. 527-534. <https://doi.org/10.15407/mining08.04.527>.

2. **Іванова А.В.** *Солоне вугілля Західного Донбасу* / А.В. Іванова, Г.А. Кривега. – К.: Наукова Думка, 1985. – 122 с.

3. **Круть О.А.** *Проблеми солоного вугілля України* // *Вісник НАН України*. – 2015. – №6. – С. 55-59.

4. **Шендрік Т.Г.** *Розподіл натрію в «солоному» вугіллі Західного Донбасу* / Т.Г. Шендрік, В.В. Симонова, Л.Л. Потоцька / У зб. *Структура та властивості вкопного вугілля*. – К.: Наукова думка, 1986. – С. 59-67.

5. **Яценко В.П.** *Аналіз шлакуючих і забруднюючих властивостей індивідуального вугільного палива та його сумішей* / В.П. Яценко // *Проблеми загальної енергетики*. – 2007. – № 16. – С. 96-100.

6. **Шендрік Т.Г.** *Вплив компонентів суміші на формування тугоплавких сполук при спільному спалюванні вугілля різного генезису* / Т.Г. Шендрік, Н.І. Дунаєвська, А.І. Фатеев / *Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку. XVIII Міжнародна науково-практична конференція: зб. наук. праць*. К.: НАНУ, 2022. – С.174-181 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ceti-nasu.org.ua/upload/iblock/be1/be16a4c61c553ee95380370a2bf6bdc3.pdf>.

7. **Майстренко, А.Ю.** *Технології газифікації углей для парогазових установок* / А.Ю. Майстренко, А.Н. Дудник, С.В. Яцкевич / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.13454.18244>.

8. **Пінчук В.О., Чемеринський М.С., Тутова О.В.** *Дослідження процесу газифікації солоного вугілля України* / В.О. Пінчук, М.С.Чемеринський, О.В. Тутова / *Сучасні технології переробки паливних копалин : тези доп. 7-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 17-18 квітня 2024 р.* – Харків : НТУ "ХПІ", 2024. – С. 37-40 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79046>.

9. **Shendrik T.G.** *Chlorine behavior at salty coals thermal treatment* / T.G. Shendrik, V.V. Simonova, L.Ya. Afanasenko / *Proc. 8th Int. Conf. «Coal Science», Oviedo, Spain, 1995, Sept., v. 1, P. 823-827.*

10. **Le Bolay N.** *Etude cinétique de la vapogazéification de coke. 2. Etude en lit fluidisé* / N. Le Bolay, C. Laguerie, H. Angelino // *Entropie*. – 1989. – 25. – № 149. – P. 15-26.

11. **Valenrue C.** *Gasification in stam of a situminous coal from ponavvoga (Cordoba, Spain) and of different samples from it* / C. Valenrue, A.G. Bevnalle, V.S. Gomer // *J.Jherm, Annl.* – 1985. – 30. – № 3. – P. 597-602.

12. **Lissner F.** *Versuchezur Verbrennung von salzhaltiger Braunkohle in einer Halbgasfeuerung mit Rauchgasrückführung* / F. Lissner, E. Rammler, R. Schmidt [et al] // *Abh. Sachs. Akad. Wiss. Leipzig*. – 1971. – 51. – № 1. – S. 43-57.

13. **Everett A. Sondreal.** *Low-Rank Coal: Its Present and Future Role in the United States* // **Everett A. Sondreal,**

George A. Wiltsee // *Annual Review of Energy*. – 2003. – 9(1). – P. 473-499. <https://doi.org/10.1146/annurev.eg.09.110184.002353>.

14. Gasner L.L. The addition of salt to fluidized bed combustors / L.L. Gasner / In: *Fifth symp. salt. Vol. 2. Solution mining. salt. prod., salt mark. Environ. probl.* – Ohio, 1980. – P. 439-445.

15. Патент на корисну модель №116778 Україна МПК (2017.01) B03B 7/00. Спосіб збагачення солоного вугілля. Фатеев А.І., Круть О.А., Дунаєвська Н.І., Нехамін М.М. опубл. 12.06.2017, Бюл.№ 11.

16. Сидорович Я.І. Дослідження можливості зв'язування хлоридів "солоного" вугілля Донбасу у стійкі сполуки при 700-1000 °С та переробки на дослідно-промисловій установці / Я.І. Сидорович, Л.Є. Каночкіна, Д.І. Фільц [та ін.] / Звіт про виконання

НДР / Інститут геології та геохімії горючих копалин АН УРСР. – Львів, 1987. – 49 с.

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

18. Брик Д.В. Геотехнологія отримання синтез-газу (CO+H₂) та енергетичного газу (CH₄+CO₂) способом підземної газифікації вугілля / Д.В. Брик, Ю.В. Стефанік // *Вуглехімічний журнал*. – 2007. – № 1-2. – С. 49-54.

Рукопис надійшов до редакції 28.08.2024

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-5-20-28

Specialty 161. U.D.C. 662.74:66.092 + 553.93

PROSPECTS FOR THERMOCHEMICAL PROCESSING OF SALTY COALS IN UKRAINE

© D.V. Bryk, Doctor of Technical Sciences, D.Z. Kulchytska-Zhygaylo, O.V. Hvozdevych, Yu.Ya. Gerlevskiy (Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the National Academy of Sciences of Ukraine, 3a Naukova str., Lviv, 79060, Ukraine)

The article shows that the need for a comprehensive study of salty coal (SC) is largely determined by the technological challenges of using it for energy purposes. The combustion of salty coal causes slagging of boilers with subsequent destruction of metal parts and heat-insulating carborundum materials. From the experience of salty coal combustion, it is known that the presence of sodium in coal leads to a decrease in the slagging temperature of 750-850 °C. In addition, the combustion of SC causes sodium condensation on the walls of pipelines and heat exchange surfaces. Specific characteristics of the SC, on which its thermochemical processing depends, are formulated. It is shown that currently, for the use of SC in different countries, it is proposed to burn it together with other coal; the possibilities of creating new equipment and reconstruction of existing boiler plants for burning coal without preliminary cleaning are considered. It is noted that the use of various fluxes and rocks containing kaolin was also studied, and methods of salty coal gasification were developed.

Attention is paid to the developments of the Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the National Academy of Sciences of Ukraine (Lviv), where a bench-scale installation for studying the processes of thermochemical processing of lump coal has been created. A promising process for the thermochemical conversion of salty coal can also be the patented methods of gasification of water-coal pulp developed at the Institute, which involves both sodium leaching at the initial stage of the process when the pulp is introduced into the reactor and its rapid transition to a water-vapour extract directly during the high-temperature process of pulp gasification.

The article presents the principle technological schemes of the method of SC conversion, in particular, thermochemical processing of salty coal pulp, patented by IGGGK NAS of Ukraine. In addition to the surface processing of SC, salty coal deposits may be suitable for the use of underground gasification technology.

It has been determined that the most promising areas of thermochemical conversion of salty coal will be the gasification of water-coal pulp and underground gasification processes. Therefore, the problem of salty coal requires further scientific research.

Keywords: salty coal, energy purposes, combustion, slagging, thermochemical processing, coal pulp, underground coal gasification.

Corresponding author D.V. Bryk, e-mail: dmytrobryk@ukr.net

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ПІДСУШКИ ВУГІЛЬНОЇ ШИХТИ З ЗАСТОСУВАННЯМ ДИМОВИХ ГАЗІВ© С.О. Кравченко¹, В.М. Фоміна², С.В. Чаплянко³*ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДЕРЖАВНИЙ ІНСТИТУТ ПО ПРОЕКТУВАННЮ ПІДПРИЄМСТВ КОКСОХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ» (ДП «ГИПРОКОКС»), 61002, м. Харків, вул. Сумська 60, Україна*¹ Кравченко Сергій Олександрович, канд. техн. наук, в.о. директора, головний інженер, e-mail: main@giprokoks.com² Фоміна Віра Михайлівна, начальник групи вугільного відділу, e-mail: uo.gpk.ua@gmail.com³ Чаплянко Світлана Володимирівна, канд. техн. наук, с.н.с., учений секретар, e-mail: chaplianko_sv@ukr.net

Розглянуто процеси та розроблено технологічну схему підсушки вугільної шихти до 5,5 % вологості із використанням барабаних сушарок при застосуванні тепла продуктів горіння коксового газу з додаванням димових газів із борова димової труби коксової батареї за наступними головними вихідними вимогами: продуктивність коксової батареї становить 930000 т/рік сухого валового коксу; крупність вугільної шихти від 75 до 80 % класу 0-3 мм, щільність сухої шихти – 1400 кг/м³, насипна маса – 700 кг/м³. Із врахуванням потреби сушильного відділення у вугільній шихті середньою вологістю 10,5 % (214078 кг/год) передбачено встановлення двох робочих ліній підсушування шихти (два модулі по 107039 кг/год) і однієї резервної (один модуль).

Для визначення обладнання однієї робочої лінії розраховано матеріальний і тепловий баланси. Перерахунком витрат димових газів борова димової труби коксової батареї на теплову енергію доведено ефективність їх використання: зменшення витрати коксового газу становить 43,56 % (розрахункова витрата коксового газу на сушіння без застосування топкових газів становить 1290 м³/год, із застосуванням – 728 м³/год).

Змішування димових газів топкового агрегату сушильного барабана та газів з борова димової труби коксової батареї передбачено в змішувальній камері (перед барабаном). У цьому процесі здійснюється регулювання витрати топкових газів: збільшення обсягу подачі газів з борова труби при одночасному зменшенні обсягу подачі газів від топкового агрегату. Також передбачено впровадження автоматизованої системи управління технологічними процесами, яка включає: збір та первинну обробку вхідної інформації; подання інформації оперативному персоналу про перебіг технологічного процесу; діагностику основного обладнання системи; підвищення надійності роботи основного обладнання; оптимізацію режиму роботи обладнання системи; дистанційне керування технологічним обладнанням в автоматичному та ручному режимі.

Доведено економічну ефективність процесу підсушки вугільної шихти за розробленою схемою: термін окупності, розрахований із річного економічного ефекту, становить 2,9 роки.

Ключові слова: коксування, кам'яновугільна шихта, підсушування, теплоносії, димові гази, відпрацьована пара, сушарка.

Автор для листування С.В. Чаплянко e-mail: chaplianko_sv@ukr.net

Підвищення енергоефективності процесів у промисловості України має особливу важливість, враховуючи, що енергоємність валового внутрішнього продукту більш ніж вдвічі вища за енергоємність промислово розвинутих країн Західної Європи. ДП «ГИПРОКОКС», як провідна проектна наукова установа у коксохімічній галузі промисловості, розробляє, удосконалює і впроваджує новітні технології та сучасне обладнання, що забезпечують підвищення ефективності діяльності коксохімічних виробництв [1-6].

У даній роботі наведено результати досліджень методів і технологій зниження вологості вугільної шихти, які дозволяють підвищити якість коксу та продуктивність коксових батарей (КБ) при зниженні енергетичних витрат, зменшенні кількості стічних вод і парогазових продуктів коксування. При вирішенні питання захисту робочого й навколишнього середовища особливу увагу приділено заходам з очищення повітря робочої зони у виробничих

приміщеннях та аспірації пило-повітряних потоків від технологічного обладнання, оскільки підсушування вугільної шихти (від 0 мм до 3 мм) пов'язано з утворенням великого обсягу вугільного пилу (при транспортуванні шихти та її завантаженні в камеру коксування).

При виборі типу сушарки конвективного типу (поміж труб-сушарок, реакторів киплячого шару і барабанних сушарок, що обертаються) перевагу було надано барабанній (насамперед, через показники питомих витрат палива та електроенергії на сушіння, а також обсяг будівельно-монтажних робіт сушильних відділень), яка укрупнено включає в себе: топковий пристрій, барабан із завантажувальною і вивантажувальною камерою та систему пиловловлення. Перевальні пристрої: підйомно-лопатеві, ступінь заповнення барабана 0,12 (12 % від об'єму барабана). Напряга робочого об'єму сушильного барабана за вологою 60 кг/(м³·год) - в межах від 60 до 150 кг/(м³ год). Теплоносій – продукти згорання коксового газу з додаванням димових газів із борова димової труби КБ.

Конструкція прийнятого безфутерувального теплогенератору найпростіша в експлуатації і менш громіздка, оскільки відзначається меншою металомісткістю обладнання при застосуванні газового палива. Використання топкових пристроїв на твердому паливі пов'язане із застосуванням додаткових механізмів: подачі палива в топку, видалення відпрацьованого палива – золи. Також потрібне застосування великої кількості вогнетривих топки та матеріалів теплової ізоляції обслуговуючих механізмів.

Одним із можливих шляхів інтенсифікації процесу конвективного сушіння матеріалу в барабанних сушарках є застосування конкретної схеми подачі теплоносія: прямої або протитої. Протитої схема подачі теплоносія при зустрічному русі матеріалу та сушильного агенту значно інтенсифікує процес теплообміну, суттєво прискорюючи процес вилучення вологи. Однак, при цьому створюється несприятливий фактор - збільшення об'єму сухого пилу, що йде на аспірацію, і збільшення вмісту в складі пилу дрібних частинок, що значно ускладнює процес очищення відпрацьованих газів від пилу, при якому відбувається також винесення і більших частинок вугілля. Тому в технічних рішеннях прийнята прямоточна схема подачі теплоносія в барабанну сушарку.

Метою роботи є розробка технологічної схеми підсушки вугільної шихти до 5,5 % вологості із використанням барабанних сушарок при застосуванні тепла продуктів горіння коксового газу з додаванням димових газів із борова димової труби КБ.

Основні вихідні вимоги:

- продуктивність КБ – 930000 т/рік сухого валового коксу;
- потреба КБ у сухій шихті – 191600 кг/год.;
- режим роботи сушильного відділення – 365 днів на рік (17,5 год./добу);
- потреба сушильного відділення у шихті вологістю 9-12 % (середня 10,5 %) – 214078 кг/год.;
- крупність шихти – від 75 до 80 % класу 0-3 мм;
- щільність сухої шихти – 1400 кг/м³, насипна маса – 700 кг/м³;
- паливо – коксовий газ (H₂ – 58 %, CH₄ – 26 %, C₂H₆ – 2 %, CO – 7 %, N₂ – 4 %, CO₂ – 2 %, O₂ – 1 %) щільністю 0,472 кг/м³ із теплою згорання 16770 кДж/м³ (4303 ккал/м³);
- температура шихти початкова 20 °С, кінцева 70 °С;
- температура топкових газів початкова (на вході в барабан) 600 °С (max), кінцева (на виході з барабана) 105 °С (min);
- повітря зовнішнє: температура 20 °С, вміст вологи 8 г/кг, коефіцієнт надлишку повітря на горіння 1,2.
- Додаткові довідкові дані для розрахунків:
- теплоємність висушеної шихти кам'яного вугілля – 1,3 кДж/(кг·°С);
- середня питома теплоємність водяної пари – 1,97 кДж/(кг·°С);
- справжня питома теплоємність водяної пари – 1,86 кДж/(кг·°С);
- питома теплота пароутворення води (при 100 °С) – 2300 кДж/кг;
- середня питома теплоємність сухого повітря (при 0 °С) – 1,01 кДж/(кг °С);
- втрати в навколишнє середовище тепла на 1 кг вологи, що випаровується, – 22,6 кДж/кг;
- За основу взято широко поширений процес підсушування шихти за способом *Coal Moisture Control* [7]. Із врахуванням потреби сушильного відділення у вугільній шихті передбачено встановлення двох робочих ліній підсушування шихти (два модулі по 107039 кг/год.) і однієї резервної (один модуль).
- Для визначення обладнання однієї робочої лінії (модуля) розраховано матеріальний і тепловий баланси (рис. 1, 2).
- Розрахунками визначено:
- кількість топкових газів (при згоранні коксового газу без урахування димових газів борова димової труби КБ) на виході із сушарки становить 14747,54 м³/год (складається з продуктів згорання коксового газу в кількості 7724,8 м³/год та з випареної вологи в кількості 7022,74 м³/год);
- витрати коксового газу (без урахування димових газів борова димової труби КБ) становлять.



Рис. 1 Схема матеріального балансу процесу підсушування шихти

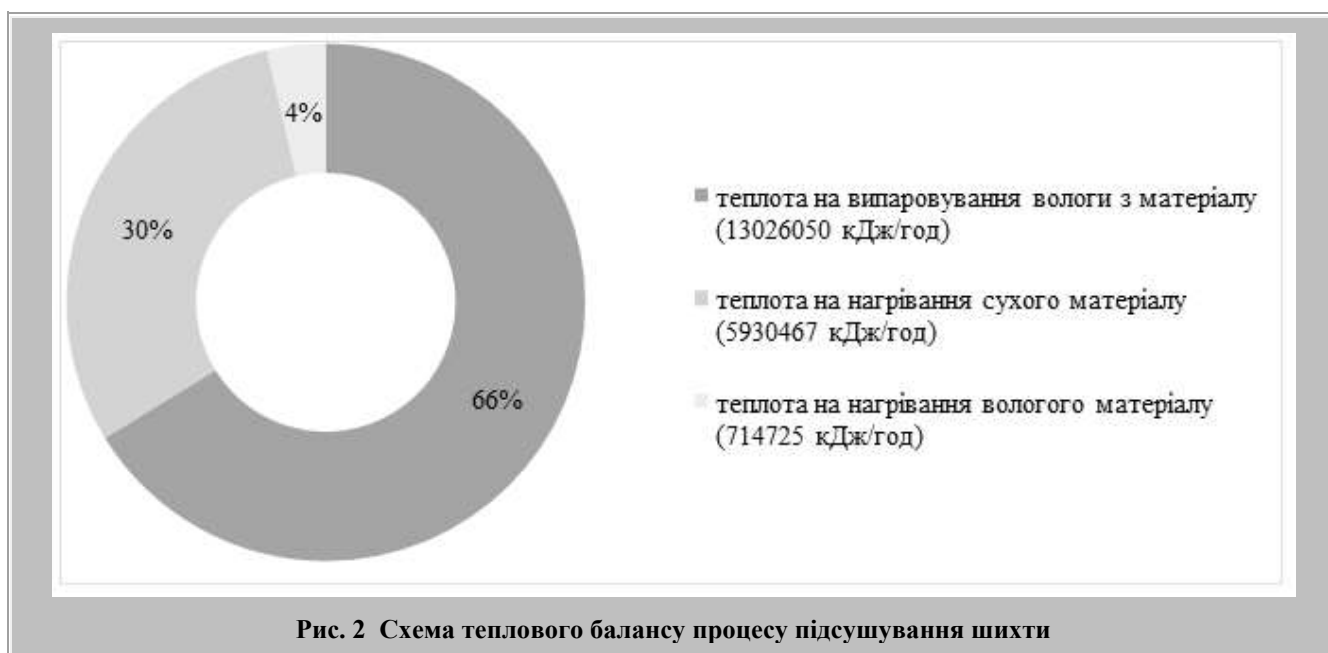


Рис. 2 Схема теплового балансу процесу підсушування шихти

При виконанні розрахунків із застосуванням димових газів борова димової труби КБ враховували, що максимальний обсяг димових газів за годину в борві димової труби КБ становить 179496 м³/год (при температурі газів, що підводять: номінальна – 300 °С, максимальна – 400 °С, мінімальна – 250 °С). Однак для забезпечення стабільності гідравлічного режиму КБ рекомендується на процес підсушування відбирати не більше 50 % димових газів із борова димової труби КБ, тобто 89748 м³/год для двох сушарок і 44874 м³/год для однієї сушарки.

Перерахунком витрат димових газів борова димової труби КБ на теплову енергію доведено ефективність їх використання: зменшення витрати коксового газу становить 43,56 % (розрахункова витрата коксового газу на сушіння без застосування топкових газів від борова димової труби КБ становить 1290 м³/год, із застосуванням – 728 м³/год).

Окремо слід зазначити, що змішування димових газів топкового агрегату сушильного барабана та газів з борова димової труби відбувається в змішувальній камері (перед барабаном). У цьому процесі здійснюється

ся регулювання витрати топкових газів: збільшення обсягу подачі газів з борову труби КБ при одночасному зменшенні обсягу подачі газів від топкового агрегату, що одночасно сприяє зменшенню витрати коксового газу на горіння, зменшенню витрати первинного та вторинного повітря. Це регулювання здійснюється за допомогою дросельних клапанів ДХ, керованих системою КВП та А. Крім цього, від топкового агрегату проводиться підживлення гарячими газами апаратів 1 ступеня очищення для запобігання конденсації вологи на внутрішній поверхні апаратів (з метою запобігання порушення роботи всього сушильного відділення).

Визначено основні конструктивні розміри (при оптимальному відношенні довжини до діаметру, яке дорівнює 6) і встановлено марку та характеристики типової сушарки: маса - 129520 кг, споживана потужність приводу - 132 кВт, частота обертання барабану - 0,12 об/с.

Визначено основні допоміжні пристрої технологічного процесу сушіння.

Розроблено технологічні схеми підсушування шихти. Кожна технологічна лінія складається із наступних основних агрегатів:

- бункер вологої шихти;
- дозатор безперервної дії (стрічковий);
- сушарка барабанна;
- шлюзовий живильник;
- теплогенератор безфутерувальний;
- вентилятор подачі повітря;
- димосос димових газів із борова димової труби КБ;
- пиловловлювач батарейний циклонний першого ступеня очищення;
- рукавний фільтр другого ступеня очищення;
- димосос димових газів від сушильного барабану;
- клапани дросельні;
- збірний стрічковий конвеєр (один для всіх трьох технологічних ліній, який подає на тракт вугільної вежі);
- шнекові розвантажувачі.

Слід зазначити, що для всіх трьох технологічних ліній (модулів) є спільними: конвеєр, що веде до сушильного відділення, клапан після цього конвеєра, конвеєр над трьома бункерами вологої вугільної шихти та скидач плужковий.

Укрупнено процес сушіння наступний. Шихта вологістю 10,5 % після відділення остаточного дроблення (або змішувального відділення) конвеєром подається у бункери вологої вугільної шихти ємністю 108 т кожен. Із бункерів шихта дозаторами безперервної дії спрямовується в барабанні сушарки. Для підсушування шихти до вологості 5,5 % використовується фізичне тепло прямого коксового газу (теплогенератор безфутерувальний) і тепло димових газів з борова димової труби КБ, які прямують у барабанні сушарки. Після барабанних сушарок підсушена шихта прямує на стаціонарний

стрічковий конвеєр і далі на вугільну вежу КБ. Відпрацьовані гази після сушарки барабанної піддаються двоступінчастій системі очищення в пиловловлювачах і рукавних фільтрах.

Вугільний пил пиловловлювачів та рукавних фільтрів подається на конвеєр підсушеної шихти. Джерелами викидів забруднюючих речовин в атмосферу у даному випадку є труби пилоочисних установок. Викиди забруднюючих речовин у повітря не перевищать гранично-допустимі норми (відповідно до діючих нормативів). Рішення з внутрішньої сантехніки прийняті відповідно до санітарних норм і прогресивних рішень та забезпечують сприятливі, комфортні умови праці, безпечну експлуатацію технологічного обладнання.

Для живлення електроприймачів ділянки з підсушуванням шихти при сушильному відділенні передбачається трансформаторна підстанція. Апаратура управління електроприводами розміщується на щитах управління електродвигунами змінного струму, які встановлюються на об'єктах у спеціальних приміщеннях. Для управління механізмами потоково-транспортної системи з підсушуванням шихти перед коксуванням використано мікропроцесорну техніку. Робота передбачає впровадження автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУ ТП), яка включає:

- збір та первинну обробку вхідної інформації;
- подання інформації оперативному персоналу про перебіг технологічного процесу;
- діагностику основного обладнання системи;
- підвищення надійності роботи основного обладнання;
- оптимізацію режиму роботи обладнання системи;
- дистанційне керування технологічним обладнанням в автоматичному та ручному режимі.

Щодо економічної складової процесу підсушки вугільної шихти при застосуванні тепла продуктів горіння коксового газу з додаванням димових газів із борова димової труби КБ: доведено економічну ефективність. Термін окупності, розрахований із річного економічного ефекту (по вартості додаткового випуску коксу 7 %) становить 2,9 роки.

Висновки

Таким чином, розроблена технологічна схема підсушки вугільної шихти до 5,5 % вологості із використанням барабанних сушарок при застосуванні тепла продуктів горіння коксового газу з додаванням димових газів із борова димової труби КБ повністю відповідає заданим техніко-технологічним і екологічним вимогам та є економічно доцільною.

У подальшому результати роботи враховуватимуться ДП «ГИПРОКОКС» у проєктах сушильних відділень для конкретних коксохімічних підприємств, враховуючи можливість включення технології підсушки вугільної шихти в діючий технологічний ланцюжок.

Бібліографічний список

1. **Кравченко С.О.** Утилізація надлишкового газу УСГК / **С.О. Кравченко, Д.В. Мірошніченко** // Вуглехімічний журнал. – 2023. – № 2. – С. 3-8. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-2-3-9>.

2. **Кравченко С.О.** Ефективність встановлення субеконмайзера у котельні УСГК / **С.О. Кравченко, С.В. Чаплянко, А.О. Волошин, С.О. Ларін** // Вуглехімічний журнал. – 2023. – № 4. – С. 3-6. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-4-3-6>.

3. **Кравченко С.О.** Ефективність виконання сатуратора з нержавіючої сталі // **С.О. Кравченко, С.В. Чаплянко, С.В. Сухорукова, А.В. Рогожин, А.А. Козтін** // Вуглехімічний журнал. – 2023. – № 5. – С. 33-37. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-5-33-37>.

4. **Трембач Т.Ф.** Посадання енерго-ресурсозберігаючих та екологічно безпечних технологій в проєктах ДП «ГИПРОКОКС» / **Т.Ф. Трембач, М.В. Мезенцева, І.О.**

Радичук // Вуглехімічний журнал. – 2024. – № 1. – С. 21-26. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2024-0-1-21-26>.

5. **Кравченко С.О.** Впровадження технології трамбування на діючих коксових батареях / **С.О. Кравченко, Д.В. Мірошніченко, В.В. Коваль, М.О. Соловійов і др.** // Вуглехімічний журнал. – 2024. – № 2. – С. 14-28. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2024-0-2-14-28>.

6. **Кравченко С.О.** Підсушка вугільної шихти з застосуванням димових газів / **С.О. Кравченко, В.М. Фоміна, С.В. Чаплянко** // International Scientific and Practical Internet Conference (Dnipro, May 16-17, 2024) / FOP **Marenichenko V.V.**, Dnipro, Ukraine, P. 118-120 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.wayscience.com/konferentsiya-3-16-17-travnya-2024/>.

7. Coal Moisture Control Plant / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tsk-g.co.jp/en/tech/industry/coal-moisture-control/>.

Рукопис надійшов до редакції 19.06.2024

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-5-29-33

Specialty 161. U.D.C. 622.79

ELABORATION OF PROCESS DIAGRAM FOR COAL BLEND DRYING USING WASTE GASES

© **S.A. Kravchenko**, Ph.D. in technical sciences, **V. Fomina**, **S.V. Chaplianko**, Ph.D. in technical sciences (STATE ENTERPRISE "STATE INSTITUTE FOR DESIGNING ENTERPRISES OF COKE OVEN AND BY-PRODUCT PLANTS" (SE "GIPROKOKS"), 60 Sumska str., Kharkiv, 61002, Ukraine)

There were considered a processes and a technological scheme was developed for drying coal blend up to 5,5 % moisture content with the help of drum dryers using the heat of coke oven gas combustion products with the addition of waste gases from the chimney flue of the coke battery according to the following main initial requirements: coke oven battery capacity makes up 930000 tpy of dry gross coke; coal blend coarseness from 75 to 80 % of 0-3 mm grade; coal blend density – 1400 kg/m³, bulk weight – 700 kg/m³. Considering the need of drying department in coal blend with an average moisture content of 10,5 % (214078 kg/h), it is planned to install two working lines for drying the coal blend (two modules of 107039 kg/h each) and one reserve (one module).

To determine the equipment for one work line, there were calculated the material and heat balance. Conversation of the waste gases consumption of the coke battery chimney flue into thermal energy proved the efficiency of their use: the reduction of coke gas consumption is 43,56 % (the estimated consumption of coke gas for drying without the use of combustion gases is 1290 m³/h, with the use of 728 m³/h).

Mixing of combustion gases from the combustion unit of the drying drum and gases from the chimney flue of the coke battery is provided in the mixing chamber (before the drum). In this process, the flow of combustion gases is controlled: increasing the volume of gas supply from the chimney flue while simultaneously reducing the volume of gas supply from the combustion unit. It is also envisaged to introduce an automated system for technological processes control, which includes: collection and initial processing of input information; providing information to operational personnel about the course of the technological process; diagnostics of the main equipment of the system; increasing the reliability of the main equipment; optimization of system equipment operation mode; remote control of technological equipment in automatic and manual mode.

The economic efficiency of the coal blend drying process according to the developed scheme has been proven: the payback period, calculated based on the annual economic effect, is 2,9 years.

Keywords: coking, coal blend, moisture, drying, heat treatment, heat carrier, exhaust gas, exhaust steam, dryer.

Corresponding author **S.V. Chaplianko**, e-mail: chaplianko_sv@ukr.net



АСПЕКТИ ВПЛИВУ НА ВЕЛИЧИНУ ТИСКУ РОЗПИРАННЯ ВУГІЛЬНОЇ ШИХТИ ТА МЕТАЛУРГІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КОКСУ. ПОВІДОМЛЕННЯ 1. ФОРМУВАННЯ ТИСКУ РОЗПИРАННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВЛАСТИВОСТЕЙ ВУГІЛЬНИХ КОНЦЕНТРАТІВ© Д.В. Мірошніченко¹*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), м. Харків, вул. Кирпичова, 2, 61002, Україна*К.О. Шмельцер², М.В. Кремер³*Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, вул. Медична, 16, 50005, Україна*О.В. Ситник⁴*ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)», вул. Весніна, 7, м. Харків, 61000, Україна*І.М. Авдеюк⁵*НТУ «ХПІ»*¹ Мірошніченко Денис Вікторович, докт. техн. наук, проф., зав. кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива (КТПНГТП), e-mail: dvmir79@gmail.com² Шмельцер Катерина Олегівна, канд. техн. наук, доц., зав. кафедри «Хімічні технології та інженерія» (КХТІ), e-mail: shmeltser@duet.edu.ua³ Кремер Марина Віталіївна, канд. техн. наук, доц., доц. КХТІ, e-mail: shmeltser@duet.edu.ua⁴ Ситник Олексій Володимирович, канд. техн. наук, ст. досл., провідн. наук. співр. Коксового відділу, e-mail: aleksevsytnik48@gmail.com⁵ Авдеюк Ілля Миколайович, аспірант (КТПНГТП), e-mail: illia.avdeiuik@iht.khpi.edu.ua

Показано, що при формуванні складу вугільних шихт для коксування необхідно вирішувати не тільки завдання отримання металургійного коксу з високими фізико-механічними характеристиками, а й забезпечити оптимальні умови експлуатації та збереження пічного фонду з урахуванням тиску розпирання вугільної сировини. Надано визначення тиску розпирання, тобто тиску, який проявляє вугільна маса, що перейшла в пластичний стан за умови, що вона позбавлена можливості вільно розширюватися. Головною причиною розвитку тиску розпирання вважається тиск в пластичному шарі парогазових продуктів термічного розкладання вугілля, який через напівкокс-кокс передається на вогнетривку стінку опалювального простінка камери коксування, зумовлюючи його прогинання.

На підставі дослідження пластично-в'язких властивостей вугільних концентратів за методом Гізелера підтверджено зв'язок особливостей пластичного стану вугілля різного ступеню метаморфізму з тиском розпирання P^h , яке воно розвиває при коксуванні. Мінімальні значення P^h фіксували у вугілля марок ДГ, Г та ГЖ ($P^h_{сер} = 2,5$ кПа), максимальні – у коксового та піснувато спікливого вугілля ($P^h_{сер}$ від 7,9 до 25,3 кПа).

Встановлено взаємозв'язок тиску розпирання з генетичними та технологічними властивостями вугільної сировини (виходом летких речовин та показником відбиття вітриніту). Розроблено регресійні рівняння для прогнозування тиску розпирання з урахуванням показника відбиття вітриніту, вмісту вітриніту та фюзенізованих компонентів, температури максимальної плинності та виходу летких речовин шихти. Розроблені рівняння характеризується високими коефіцієнтами кореляції r (0,89-0,9), що свідчить про їх статистичну значимість та можливість використання для прогнозування зазначеного показника. Використання запропонованих рівнянь дає можливість прогнозувати тиск розпирання, оперуючи даними властивостей вугільних концентратів, які обов'язково визначаються на коксохімічному підприємстві для контролю якості сировини.

Ключові слова: тиск розпирання, пластично-в'язкі властивості, компонентний склад, петрографічні характеристики, вихід летких речовин.

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

Вступ

Удосконалення доменної плавки, впровадження ресурсозберігаючих технологій, до яких відноситься і вдування пило-вугільного палива (ПВП), вимагає підвищення вимог до рівня механічних (дробимість M_{25} , стиральність M_{10} , гранулометричний склад) та термохімічних (CSR, CRI) властивостей коксу при одночасному дефіциті та обмеженості ресурсів добреспікливого вугілля.

Необхідність виробництва високоякісного металургійного коксу обумовила формування сировинної бази на коксохімічних підприємствах України з вугілля багато-басейнової приналежності. Відмінності технологічних властивостей і речовинного складу імпортного та українського вугільних концентратів потребують уточнення й удосконалення основних технологічних прийомів підготовки під час їх використання у вугільних шихтах. Досягнення високої якості коксу для доменної плавки можливе за умови комплексного, науково обґрунтованого підходу до вдосконалення технології підготовки вугілля до коксування, що полягає в розробці методів і технологічних заходів, основними з яких є:

- прогнозування та оптимізація складу шихти з урахуванням петрографічних характеристик її компонентів і тиску розпирання вугільних концентратів [1];
- необхідність переходу на більш ефективні схеми кінцевого подрібнення з урахуванням петрографічних характеристик компонентів вугільної шихти в комплексі з відсівом дрібних класів перед подрібненням [2];
- впровадження організованого змішування компонентів вугільної шихти для її гомогенізації [3];
- контроль ступеню окиснення вугільних концентратів [4, 5].

Для розширення сировинної бази коксівного вугілля необхідним є впровадження перспективних технологій, таких як модифікація шихт за допомогою добавок: неорганічних (карбонати, карбіди), опіснюючих (антрацит, коксовий дріб'язок та пил), органічних (рідинні та тверді продукти нафтохімічного і коксохімічного виробництва [6-9]; коксування трамбованих шихт [10, 11]; технологія коксування термічно підготовлених шихт [12-16]. Залучення слабкоспікливого, або неспікливого вугілля до складу вугільних шихт є можливим при впровадженні брикетування/часткового брикетування шихти [17-23].

Застосування зазначених методів безпосередньо впливає на насипну щільність вугільного завантаження, спікливість, а отже, на якість одержуваного коксу та виробничу потужність коксових камер. Необхідно також зазначити, що їх впровадження підвищує екологічну безпеку коксохімічного виробництва (за рахунок підвищення продуктивності коксової батареї зменшується питомий викид шкідливих речовин у навколишнє середовище). Але треба враховувати, що всі ці технологічні операції сприяють зростанню тиску коксування (тиску розпирання). З одного боку, за наявними даними [24-26] внутрішній тиск розпирання сприяє спіканню пластифікованих вугільних зерен і, як наслідок, покращує фізико-механічні властивості отриманого коксу. З іншого боку, цей тиск передається через шари напівкоксу і коксу на стіни камери коксування, що є джерелом так званого «присінного тиску» [27, 28]. Цей тиск може бути більшим або меншим в залежності від властивостей та складу вугільної шихти.

Отже, важливим критерієм, який необхідно враховувати при формуванні складу вугільних шихт, є безпечний тиск розпирання шихти.

В роботі [29] автори аналізують хронологію появи та розвитку гіпотез щодо механізму виникнення тиску розпирання. Вони зазначають, що першою є гіпотеза так званої «пластичної оболонки». Згідно з нею, тиск розпирання виникає на стадії нагрівання вугілля до температури його розм'якшення, яка характеризується протіканням процесів деструкції, вивільненням низькомолекулярних газів в основному за рахунок відриву функціональних груп від макромолекул. Пластичний шар, що оточує цю зону, створює своєрідний «конверт», всередині якого накопичується частина летких продуктів піролізу, що і є фактором формування тиску розпирання [29]. Згідно наступної гіпотези тиск розпирання виникає в шарах напівкоксу і коксу в результаті їх низької газопроникності, додатково лімітованої процесами крекінгу, полімеризації та конденсації летких продуктів під час контакту з гарячим коксом. Але її спростовує той факт, що на гарячу сторону, тобто через пори та тріщини напівкоксу та коксу, виділяється переважна кількість летких продуктів піролізу [29, 30].

Уваги заслуговують твердження та висновки, наведені в джерелах [29-32], в яких зазначається, що тиск розпирання виникає в пластичній масі через ускладнені умов евакуації продуктів піролізу та зростання об'єму пластифікованих вугільних зерен.

Автори [33] також зазначають, що тиск розпирання розвивається поступово, досягає максимальних значень переважно тоді, коли в камері коксування сходяться пластичні шари. При цьому гази, які виділяються в пластичній масі, не можуть подолати бар'єр, який сформувався і змушені прориватися через тріщини напівкоксу.

Отже, під тиском розпирання слід розуміти тиск, який проявляє вугільна маса, котра перейшла в пластичний стан, за умови, що вона позбавлена можливості вільно розширюватися. Головною причиною розвитку тиску розпирання вважається тиск в пластичному шарі парогазових продуктів термічного розкладання вугілля, який через напівкокс-кокс передається на вогнетривку стінку опалювального простінка камери коксування, зумовлюючи його прогинання. Згідно з Правилами технічної експлуатації коксохімічних підприємств, тиск розпирання заводських шихт не повинен перевищувати 7 кПа, при цьому забезпечуються нормальні умови експлуатації коксових батарей і тривалий термін їх ефективної служби [30-32].

Величина тиску розпирання буде залежати від природи вугільної сировини (петрографічні характеристики), властивостей пластичної маси (плинності та газопроникності) та кількості летких продуктів, які утворюються при піролізі, а також від швидкості коксування, ширини коксової камери та способу її завантаження [31]. В залежності від товщини пластичного шару, його газопроникності, а також газопроникності напівкоксу та коксу будуть формуватися умови евакуації парогазових продуктів і розвиватись відповідний тиск розпирання. Зі збільшенням щільності вугільного завантаження пористість та газопроникність тіла напівкоксу та коксу зменшується, відповідно кількість газів, які виділяються, збільшується, що призводить до зростання тиску розпирання. В цьому аспекті дуже важливим контролювання тиску розпирання трамбованого вугільного завантаження. В роботі [34] зазначено, що тиск розпирання вугілля та вугільних шихт залежить від співвідношення виходу летких речовин (V^{daf} , %) до товщини пластичного шару (Y). Також встановлена залежність тиску розпирання від максимальної плинності пластичної маси за Гізелером (F , dd/min).

Автори статі [35] вважають, що головним фактором, який визначає величину тиску розпирання, є склад газів, які виділяються. В той же час опір їх виділенню відіграє другорядну роль. Крім того, враховуючи, що на тиск розширення впливає багато різноспрямованих факторів, ця величина не є адитивною. Тому єдиним надійним способом оцінки тиску розпирання є його експериментальне визначення та підбір на основі отриманих результатів складів вугільних шихт [36].

Коксування шихт, тиск розпирання яких значно вищий за оптимальний, призводить до складнощів при

видачі готового коксового пирога, тобто до підвищення амперажу електродвигуна прес-штанги коксовиштовхувача, а в екстремальних випадках – до одиничного, або масового буріння печей. Буріння призводять до розладу режиму обігріву та графіка видачі як забурених, так і сусідніх з ними печей, а також до падіння виробництва коксу, до деформації кладки обігрівальних простінків і, як наслідок, до прискореного зношування печей та викидів забруднюючих речовин в навколишнє середовище [31-34, 36].

В роботі [28] розглядається вплив тиску розпирання вугільної шихти в процесі коксування на вогнетривку кладку коксових печей. Дослідження показали, що з підвищенням тиску розпирання шихти збільшується засмоктування сирого коксового газу в опалювальну систему коксової печі, що опосередковано підтверджує взаємозв'язок між тиском розпирання і прогином опалювального простінку. небезпека полягає в тому, що циклічно повторювані прогини, а потім вирівнювання опалювального простінку призводять до його прихованого руйнування. Показано, що характер динаміки засмоктування сирого коксового газу в опалювальну систему близький до динаміки зміни тиску розпирання в процесі коксування: найбільший об'єм фіксували в перші години періоду коксування, на при кінці періоду засмоктування було майже відсутнє.

Попри важливість урахування такого аспекту, як тиск розпирання, при шихтуванні досі немає єдиної теорії щодо механізму його виникнення, а дані різних джерел щодо факторів впливу на його величину суперечливі.

Мета та завдання дослідження

В умовах нестабільності сировинної бази та залучення нових компонентів до складу вугільних шихт із далекого зарубіжжя зростає актуальність накопичення даних щодо властивостей та величини тиску розпирання вугільних концентратів, що надходять на коксохімічне виробництво. Метою досліджень є вивчення впливу властивостей вугільної сировини на формування величини тиску розпирання при її коксуванні.

Матеріали та методи

В роботі в якості об'єкта досліджень використовували 17 вугільних концентратів. Шість з них репрезентовані маркою Г, п'ять – маркою Ж, три – маркою К, по одному – марками ДГ, ГЖ, та ПС.

Проби відбирали та готували згідно State standard of Ukraine 4096-2002 "Brown coal, hard coal, anthracite, combustible shale and coal briquettes. Methods of sample selection and preparation for laboratory tests" [37].

Для визначення характеристик вугільної сировини використовували стандартизовані методики:

– ISO 1171-97 "Solid mineral fuels. Methods for determination of ash" [38];

– ISO 589-81 “Hard coal–Determination of total moisture” [39];

– ISO 7404-3-84 “Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite – Part 3: Method of determining maceral group composition” [40];

– ISO 7404-5-85 “Methods for the petrographic analysis of coals–Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite” [41];

– State standard of Ukraine 7722:2015 “Hard coal. Method of Determining Plastometric Characteristics” [42].

Тиск розпирання визначали згідно ДСТУ 8724:2017 [30] за допомогою установки, яка відтворює в малому масштабі той же процес розвитку тиску розпирання, що має місце в промисловій печі. Конструкція установки схематично наведена на рис. 1, 2 [36].

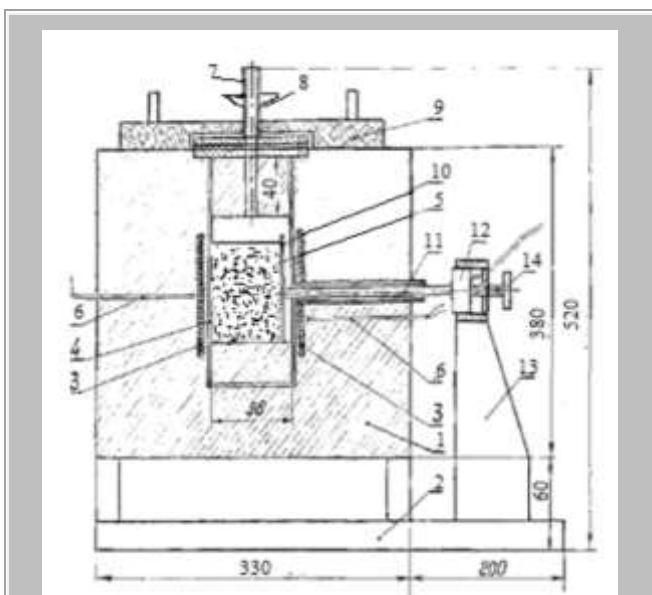


Рис. 1 Конструкція установки з визначення тиску розпирання

1 – цегляна кладка, 2 – каркас печі, 3 – нагрівальні елементи, 4 – реторта, 5 – вугільне завантаження, 6 – термопара, 7 – кришка реторти з газовідвідної трубою, 8 – тарілка, 9 – кришка, 10 – упорна пластинка, 11 – кварцовий стрижень, 12 – датчик тиску, 13 – кронштейн, 14 – юстувальний гвинт

До складу установки входить електропіч, трансформатор на 20 А, блок управління температурним режимом, блок індикації тиску розпирання, п'єзоелектричний датчик тиску на 100 кПа, кронштейн для датчика тиску, реторти для коксування зі сталі марки Ст. 3. Реторта забезпечує нагрівання до 880 ± 5 °С. Має наступні зовнішні розміри, мм: довжина – 161 ± 1 , ширина – 105 ± 1 , висота – 191 ± 1 . У верхній її частині є фланець товщиною для з'єднання з кришкою, забезпе-

ченою газовідвідним патрубком 7 з тарілкою 8 для збору частково конденсованих в газовідвідній трубці води і кам'яновугільної смоли. Реторта встановлюється в нагрівальну камеру печі з незначними зазорами. Тиск розпирання вугільного завантаження сприймає упорна пластинка, а від неї тиск через кварцовий стрижень, передається на датчик тиску. Оскільки датчик тиску нерухомий (впирається в юстувальний гвинт), то нерухомо і система «упорна пластинка – кварцовий стрижень», хоча вони і мають свободу руху. Тому, тиск розпирання вугільного завантаження розвивається при постійному обсязі, тобто за умов, аналогічних коксуванню в промисловій печі. При вимірюванні тиску розпирання спочатку включають піч в мережу 220 В. Викладають бічні стінки камери коксування реторти листовим азбестом товщиною 4 мм. Здійснюють завантаження камери реторти вугіллям (шихтою) трьома однаковими порціями, злегка підпресовуючи так, щоб висота завантаження становила 94 мм. В табл. 1 наведені необхідні параметри підготовки вугільного завантаження.

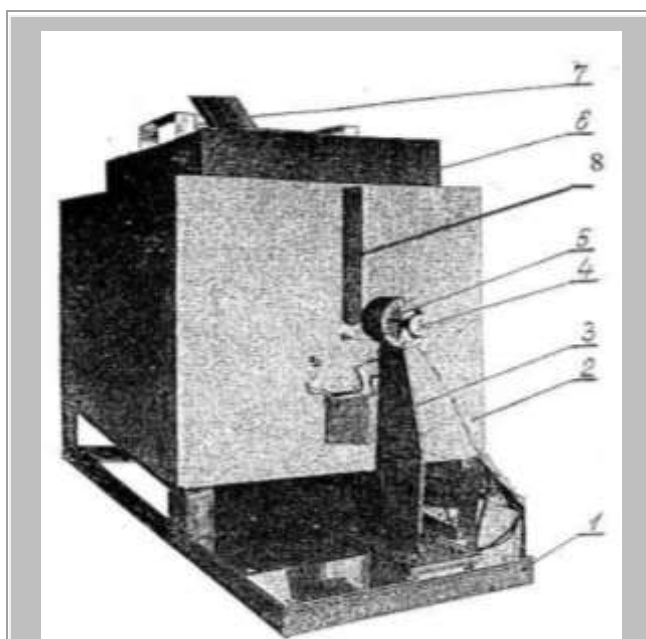


Рис. 2. Зовнішній вигляд установки для визначення тиску розпирання вугілля і шихт

1 – основа; 2 – електропіч; 3 – кронштейн; 4 – юстувальний гвинт; 5 – датчик тиску; 6 – кришка теплоізоляційна; 7 – газовідвідна труба; 8 – отвір

У розігріту піч вставляють реторту з вугільним завантаженням. Закривають верхню частину печі з ретортою теплоізоляційною кришкою, потім до торця кварцового стрижня, за допомогою юстувального гвинта,

впритул підводять датчик тиску. Величина тиску в кілопаскалях висвічується на електронному табло мікропроцесорного індикатора тиску.

Технологічні властивості вугільних концентратів представлені у табл. 2, а показники петрографічного аналізу – у табл. 3.

Таблиця 1

Параметри підготовки вугільної проби, що завантажуються в камеру коксування

Завантаження	Маса завантаження, г	Рівень подрібнення, клас ≤ 3 мм	Вологість, %	Щільність завантаження, г/см ³
Насипне	600	80 \pm 3	10 \pm 2	0,80 \pm 0,01

Таблиця 2

Технологічні властивості вугільних концентратів

Вугільні компоненти, № проби	Марка вугілля	Технічний аналіз, %				Товщина пластичного шару, мм	Тиск розпирання, кПа
		Wtr, %	Ad, %	Sd, %	Vdaf, %		
DG1	ДГ	11,6	6,4	1,48	42,2	9	1,5
G1	Г	9,4	7,2	0,29	42,6	13	2,2
G2	Г	8,3	8,1	0,45	39,1	11	3,2
G3	Г	6,9	5,3	1,66	39,6	15	2,8
G4	Г	8,0	6,0	1,24	38,2	14	2,8
G5	Г	6,7	5,9	0,27	33,6	10	3
G6	Г	9,9	7,6	0,48	38	12,5	2
GZh1	ГЖ	8,4	8,3	1,18	32,7	22	7
Zh1	Ж	6,4	7,6	0,87	34,2	18	5,2
Zh2	Ж	7,2	8,2	0,68	30,6	22	5,2
Zh3	Ж	8,2	8,1	0,93	31,9	22,5	5,6
Zh4	Ж	7,8	8,6	1,16	31,8	20	7,4
Zh5	Ж	7,9	8,3	0,49	32,3	29	5,6
K1	К	9,1	8	0,69	27,1	14	15,4
K2	К	6,1	8,5	0,82	27,4	22	7,9
K3	К	8,8	7,6	0,69	26,2	14	16,3
PS1	ПС	8,5	7,3	0,64	18,0	12	23,3

Зольність (Ad) вугільних концентратів коливалась у широкому діапазоні: 5,9–14,4 %. Вміст загальної сірки (Sdt) у вугільних концентратах знаходився в межах 0,27–1,66 %. Вихід летких речовин (Vdaf) на сухий беззольний стан складає: для газової групи – від 32,7 до 42,6 %, для вугілля марки Ж – 32,3 та 34,2 %, для вугілля марки К – від 26,2 до 27,4 %, для вугілля марки ПС – 18 %.

Можна відзначити (дані табл. 2), що тиск розпирання залежить від властивостей вугілля, обумовлених його ступенем метаморфізму. Враховуючи, що від природи, ступеня метаморфізму, перетворення органічної маси вугілля, змінюється його поведінка під час коксування найбільший тиск розпирання розвивається при коксуванні коксового та піснубатого спіктивного вугілля, мінімальні значення характерні для вугілля газової групи, жирне вугілля, яке утворює найбільшу кількість

рідинних продуктів, характеризується максимальною товщиною пластичного шару, не розвиває небезпечний тиск розпирання.

Для глибшої оцінки впливу сировинних факторів на тиск розпирання були визначені характеристики пластично-в'язких властивостей вугільних концентратів за методом Гізелера згідно ISO-FDIS 13029 Coal – Determination of plastic properties – Constant-torque Gieseler plastometer method. Technical Committee: ISO/TC 27/SC 5 ICS: 73.040, 2017 [43].

В процесі дослідження фіксувалися наступні значення температури, оС:

- початку розм'якшення, t_1 ;
- максимальної плинності, t_{max} ;
- затвердіння, t_2 ;
- діапазону пластичності, $\Delta t = t_1 - t_2$.

Таблиця 3

Петрографічна характеристика досліджених вугільних концентратів

Вугільні компоненти, № проби	Марка	Петрографічний склад (без мінеральних домішок), %					Середній довільний показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту, %							
		Vt	L	Sv	I	ΣFC		R0	Марки вугілля, що умовно відповідають стадіям метаморфізму вітриніту						
									Д	ДГ+Г	ГЖП+ГЖ	Ж	К	ПС	П
DG1	ДГ	65	11	0	24	24	0,59	2	98	-	-	-	-	-	
G1	Г	91	3	0	6	6	0,59	5	95	-	-	-	-	-	
G2	Г	70	3	0	27	27	0,65	0	98	1	1	-	-	-	
G3	Г	67	10	0	23	23	0,73	0	84	13	3	-	-	-	
G4	Г	68	7	0	25	25	0,75	0	84	14	2	-	-	-	
G5	Г	59	2	1	38	39	0,73	0	85	9	6	-	-	-	
GZh1	ГЖ	79	5	0	16	16	0,91	0	11	35	53	1	-	-	
Zh1	Ж	79	5	0	16	16	0,91	0	11	35	53	1	-	-	
Zh2	Ж	81	2	0	17	17	1,04	0	4	1	91	4	-	-	
Zh3	Ж	84	2	0	14	14	0,97	0	5	20	75	-	-	-	
Zh4	Ж	88	2	0	10	10	0,98	1	8	90	1	-	-	-	
Zh5	Ж	92	1	0	7	7	0,95	0	0	18	80	2	-	-	
Zh6	Ж	85	2	0	11	11	0,9	0	11	47	40	2	-	-	
K1	К	88	2	0	10	10	1,15	0	0	2	64	34	-	-	
K2	К	78	1	0	21	21	1,12	0	0	4	77	18	1	-	
K3	К	86	2	0	12	12	1,15	0	0	2	65	33	-	-	
PS1	ПС	78	0	0	22	22	1,53	0	0	0	0	38	60	2	

Таблиця 4

Характеристика пластично-в'язких властивостей вугільної сировини

Вугільні компоненти, № проби	Марка	Пластичні властивості за методом Гізелера				
		Fmax, ddpm	t1, оС	tmax, оС	tз, оС	Δt, оС
DG1	ДГ	11	403	428	448	45
G1	Г	189	400	435	453	53
G2	Г	58	396	429	449	54
G3	Г	3601	398	434	470	72
G4	Г	4102	398	435	477	79
G5	Г	4	424	442	451	27
G6	Г	151	397	434	463	66
GZh1	ГЖ	2734	394	442	483	89
Zh1	Ж	14054	395	440	479	84
Zh2	Ж	7665	397	451	484	87
Zh3	Ж	12650	392	445	487	95
Zh4	Ж	1993	396	445	484	88
Zh5	Ж	48932	381	438	480	99
K1	К	42	413	452	482	69
K2	К	8070	388	454	496	108
K3	К	86	413	449	479	66
PS1	ПС	9	447	477	498	51

Найважливішим показником є максимальна плинність (F_{\max} , ddpm), яка характеризує в'язкість пластичної маси [43]. Властивості пластичних мас і характер протікання процесу спікання має свої особливості залежно від ступеня метаморфізму, мацерального складу. Малометаморфізоване вугілля при піролізі утворює рідкофазні продукти, що вирізняються невисокою термічною стійкістю, низькою плинністю. Пластична маса вугілля середньої стадії метаморфізму однорідніша за складом, містить меншу кількість низькомолекулярних компонентів, рідкофазні компоненти проявляють добре виражену пластифікуючу дію. У свою чергу однорідність пластичної зони є фактором, який визначає її газопроникність.

Характеристика пластично-в'язких властивостей – у табл. 4.

Статистичний аналіз результатів та розробка математичних залежностей були виконані з використанням ліцензійної комп'ютерної програми Microsoft Excel. Для оцінки отриманих рівнянь використовували наступні статистичні оцінки: r – коефіцієнт множинної кореляції; D – коефіцієнт детермінації, %; σ – середнє квадратичне відхилення, од.; cv – коефіцієнт варіації, %.

Результати

Оцінюючи отримані дані, можна стверджувати, що максимальні пластично-в'язкі характеристики фіксували у вугілля марки Ж, мінімальні – у коксового та піснувато спікливого вугілля. Так, аналізуючи пластично-в'язкі властивості вугільної сировини треба відзначити, що для вугілля газової групи (марки ДГ, Г та ГЖ) максимальна плинність F_{\max} знаходилась в межах від 4 до 4102 поділів шкали при товщині пластичного шару в середньому $u=13$ мм, також фіксували невеликий інтервал пластичності $\Delta t_{\text{сер}}=60$ оС; для жирного вугілля

товщина пластичного шару становила в середньому 22 мм, а F_{\max} змінювалась в інтервалі від 1993 до 14054 поділів шкали з досить широким інтервалом пластичності, який в середньому склав $\Delta t_{\text{сер}}=90$ оС, для коксового вугілля (марки К) при достатньо високій спікливості (товщина пластичного шару становила 14 мм та 22 мм) отримали невисокі значення плинності, відповідно 86 до 8070 поділів шкали, піснувате спікливе має найнижчий показник плинності 9 та $\Delta t = 51$ оС.

Отже, у випадку вугілля газової групи невелика кількість пластичної маси, яка утворюється при коксуванні, є неоднорідною, швидко починає затвердівати, тому парогазові продукти можуть вільно проходити через неоднорідний шар, в наслідок чого тиск розпирання має мінімальні значення ($P_{\text{нсер}}=2,5$ кПа). Для жирного вугілля спостерігається утворення великої кількості пластичної маси, її однорідність обумовлює ускладнення умов евакуації летких продуктів, але за рахунок високої плинності не створює великого опору та не призводить до розвитку критичного тиску розпирання ($P_{\text{нсер}}=5,9$ кПа). Для коксового вугілля також характерно утворення достатньої кількості рідких продуктів, але при цьому спостерігається низька плинність, висока в'язкість та, як наслідок, низька газопроникність пластичної маси, що і призводить до підвищення тиску всередині пластичної зони та обумовлює критичні значення тиску розпирання ($P_{\text{нсер}}$ від 7,9 до 25,3 кПа).

Використовуючи інструменти регресійного аналізу, встановлено взаємозв'язки між тиском розпирання вугільних концентратів та температурами початку розм'якшення, t_1 , максимальної плинності, t_{\max} (коефіцієнти кореляції наведені в табл. 5).

Таблиця 5

Коефіцієнти кореляції між тиском розпирання та пластично-в'язкими властивостями вугільної сировини

	P_n , кПа	F_{\max} , ddpm	t_1 , оС	t_{\max} , оС	t_3 , оС	Δt , оС
P_n , кПа	1					
F_{\max} , ddpm	-0,12	1				
t_1 , оС	0,66	-0,5	1			
t_{\max} , оС	0,87	-0,08	0,62	1		
t_3 , оС	0,63	0,26	0,04	0,76	1	
Δt , оС	-0,01	0,546	-0,68	0,12	0,72	1

Зазначені показники пластично-в'язких властивостей вугілля залежать від ступеню його метаморфізму. Високі коефіцієнти кореляції між P_n та t_1 , t_3 , t_{\max} ($r = 0,66$; $r = 0,63$ та $r = 0,87$ відповідно) підтверджують тісний зв'язок та вплив природи, ступеня метаморфізму на розвиток тиску розпирання. До того ж характерною

особливістю цих показників є їх адитивність, і це робить їх використання перспективним для оптимізації складу шихт та прогнозування показника розпирання. Графічні залежності наведені на рисунках 3 і 4, математичні рівняння та їх статистичні оцінки – в табл. 7.

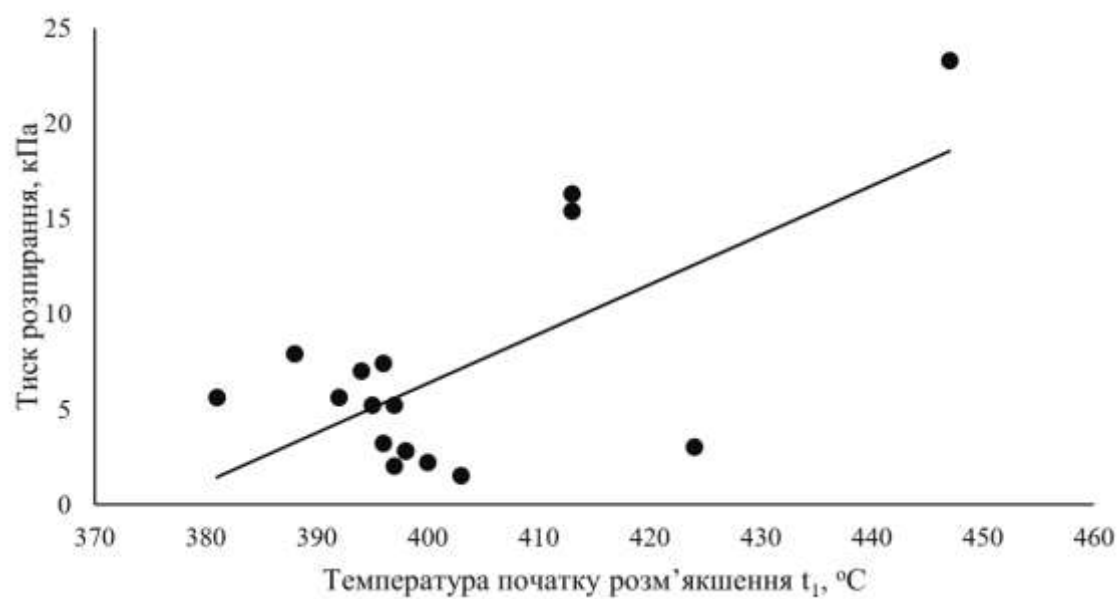


Рис. 3 Залежність тиску розпирання від температури початку розм'якшення вугілля

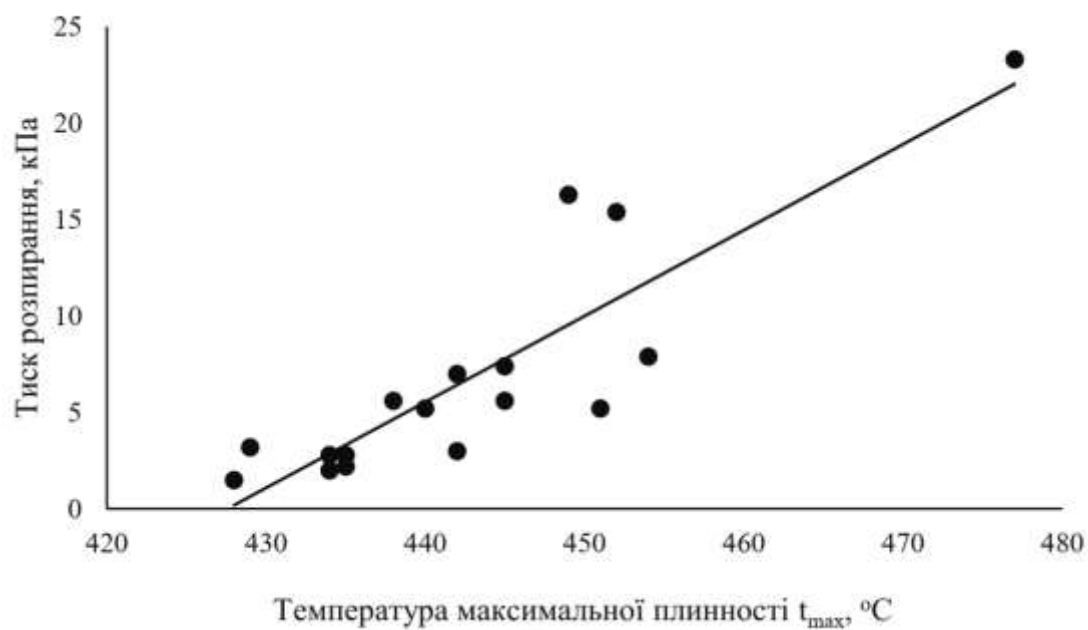


Рис. 4 Залежність тиску розпирання від температури максимальної плинності

Також встановлені взаємозв'язки між петрографічними, технологічними показниками якості вугільної сировини та тиском розпирання (табл. 3-4), які характе-

ризуються відповідними коефіцієнтами кореляції (представлені в табл. 6).

Таблиця 6

Коефіцієнти кореляції між тиском розпирання та генетичними і технологічними характеристиками вугільної сировини

	W _{tr}	Ad	Sd	V _{daf}	Y	I	V _t	R _H	R ₀	ΣFC
W _{tr}	1									
Ad	-0,06	1								
Sd	0,05	-0,32	1							
V _{daf}	0,28	-0,42	0,21	1						
Y	-0,44	0,6	0,06	-0,26	1					
I	-0,16	-0,57	0,05	0,16	-0,55	1				
V _t	0,06	0,71	-0,28	-0,35	0,58	-0,95	1			
R _H	0,002	0,27	-0,15	-0,9	-0,02	-0,24	0,37	1		
R ₀	-0,22	0,41	-0,14	-0,95	0,23	-0,22	0,38	0,89	1	
ΣFC	-0,21	-0,61	0,03	0,14	-0,5	0,96	-0,93	-0,2	-0,23	1

Встановлено вплив генетичних та технологічних властивостей вугілля на формування тиску їх розпирання при коксуванні. Тісний зв'язок підтверджують високі коефіцієнти кореляції між R_H та V_{daf}, R₀ (r = 0,9

та r = 0,89 відповідно). Відповідні графічні залежності тиску розпирання від виходу летких речовин (V_{daf}) та показника відбиття вітриніту (R₀) мають лінійний характер, представлені на рис. 5, 6.

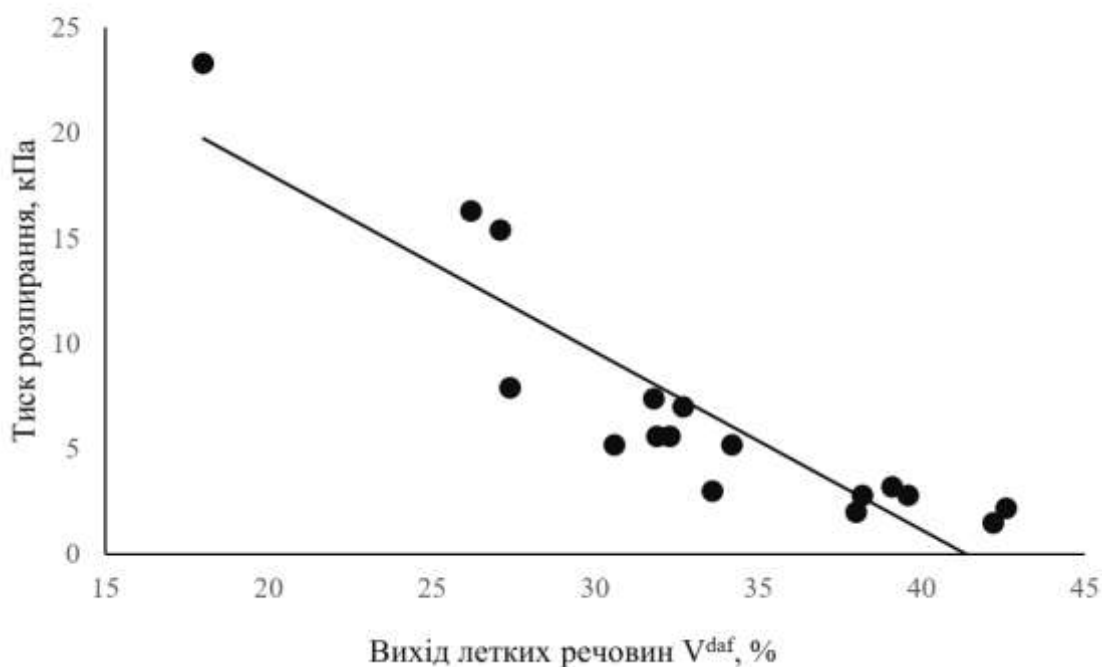


Рис. 5 Залежність тиску розпирання від виходу летких речовин

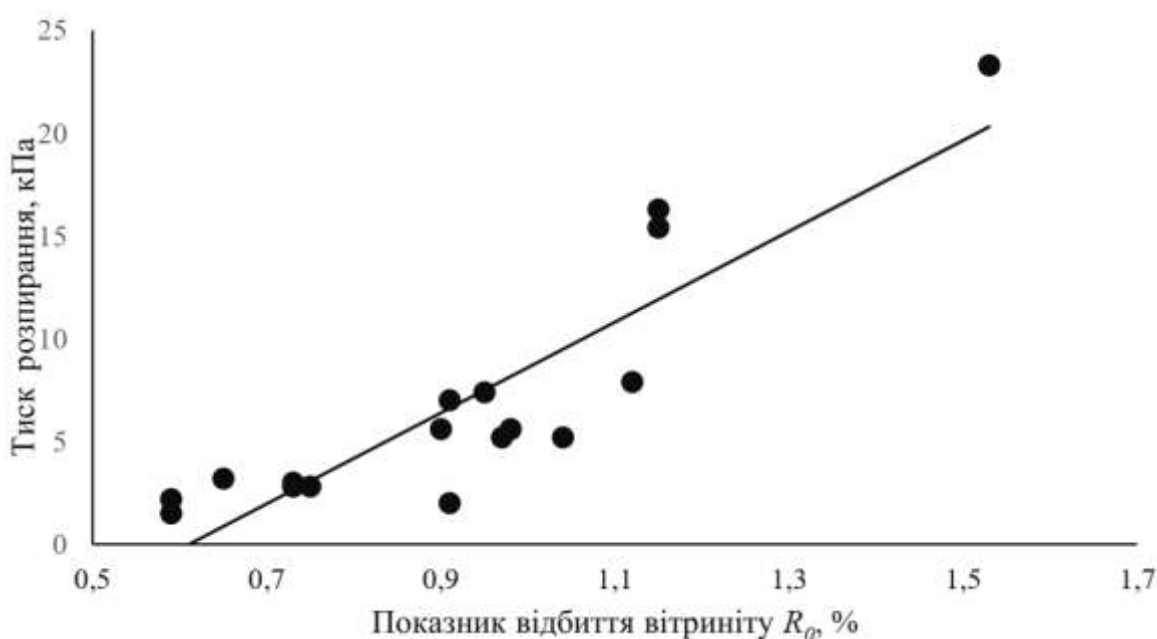


Рис. 6 Залежність тиску розпирання від показника відбиття вітриніту

Отримані математичні залежності впливу виходу зазначених характеристик сировини на величину тиску розпирання та їх статистичні оцінки наведено в табл. 7.

Даючи оцінку представленим рівнянням, можна стверджувати, що найточнішим з досліджених показників якості вугілля є показник тиску розпирання, про-

гнозований за температурою максимальної плинності, виходом летких речовин вугілля та показником відбиття вітриніту та (рівняння 2, 3 і 4). Математичні моделі характеризуються високими коефіцієнтами кореляції r (0,87; 0,9 та 0,89 відповідно).

Таблиця 7

Математичні залежності

№	Вид залежності	Статистична оцінка			
		r	D , %	σ , од.	cv , %
(1)	$P^H = 0,2594 \cdot t_1 - 97,413$	0,66	43,8	10,66	2,65
(2)	$P^H = 0,4455 \cdot t_{max} - 190,48$	0,87	76,02	8,52	1,92
(3)	$P^H = -0,8441 \cdot V^{daf} + 34,927$	0,9	80,99	6,41	19
(4)	$P^{II} = 22,102 \cdot R_0 - 13,5$	0,89	78,78	0,24	26

Встановлено, що підвищення температури початку розм'якшення вугілля та температури максимальної плинності на 1 оС призводить до збільшення тиску на 0,2594 кПа та 0,4455 кПа відповідно. При зростанні виходу летких речовин на 1% спостерігається зменшення тиску розпирання на 0,8441 кПа. При збільшенні ступеню вуглефікації за показником R_0 на 0,1 % фіксували збільшення тиску розпирання на 0,221 кПа. Аналізуючи розраховані значення коефіцієнтів варіації, можна відзначити однорідність вибірки за показниками

V^{daf} , R_0 , t_1 , t_{max} . На підставі обробки експериментальних даних за допомогою методів математичної статистики отримано регресійні рівняння, наведені в табл. 8. Рівняння (5-10) для прогнозування тиску розпирання з урахуванням показників відбиття вітриніту, вмісту вітриніту та фюзенізованих компонентів, температури максимальної плинності та виходу летких речовин шихти характеризуються високим коефіцієнтом кореляції r (0,89-0,9), тому можна їх рекомендувати для прогнозування зазначеного показника.

Регресійні рівняння

№	Рівняння	Статистична оцінка		
		r	D, %	σ, од.
(5)	$P^H = 13,69 \cdot R_0 + 0,189 \cdot t_{max} - 89,5214$	0,9	81	2,79
(6)	$P^H = -0,6549 \cdot V^{daf} + 0,109 \cdot t_{max} - 19,825$	0,9	81,5	2,76
(7)	$P^H = 24,251 \cdot R_0 - 0,00912 \cdot Vt - 12,919$	0,89	78,8	2,96
(8)	$P^H = -0,834 \cdot V^{daf} - 0,05876 \cdot \Sigma FC + 35,619$	0,9	81,67	2,75
(9)	$P^H = 22,1469 \cdot R_0 + 0,0054 \cdot \Sigma FC - 13,6365$	0,89	78,78	2,96
(10)	$P^H = -0,8285 \cdot V^{daf} + 0,0307 \cdot Vt + 31,986$	0,9	81,2	2,79

Обговорення

Результати отримані в роботі узгоджуються з висновками та твердженнями наведеними в [28, 30-34].

Авторами монографії [44] зазначається, що петрографічно однорідне донецьке вугілля марки К має високий тиск розпору – його максимальне значення може сягати 20 кПа і вище.

В роботі [5] наведено результати дослідження впливу тривалого (протягом 28 діб) окиснення бітумінозного вугілля на тиск розпирання в лабораторних умовах. Зазначено, що насичення вугілля середньої стадії метаморфізму киснем при окисненні призводить до зростання в'язкості пластичної маси та об'єму газо- і пароподібних продуктів, і в результаті обумовлює збільшення тиску розширення з 5,0 до 30,0 кПа.

Дослідженнями, результати яких наведені в роботі [45] з вивчення тиску розпирання, що виникає при коксуванні бінарних вугільних сумішей із залученням як українського, так і зарубіжного вугілля, показано, що тиск розпирання в цих сумішах при зміні в них співвідношення вмісту компонентів, що належать до різних марок вугілля, не підпорядковується правилу адитивності. У сумішах, в яких обидва компоненти належать до однієї марки вугілля, зміна тиску розпирання відбувається за правилом адитивності.

Наприклад, авторами [45] встановлено три типи залежностей тиску розпирання в бінарних сумішах від зміни в них співвідношення компонентів:

- за участю в бінарній суміші вугілля марок Г або ДГ з вугіллям іншої марки тиск розпирання завжди менше, ніж розрахований за правилом адитивності;

- за участю в бінарній суміші вугілля марки Ж з вугіллям марки К або марками ПС, КС, КП тиск розпирання суміші завжди вищий, ніж розрахований за правилом адитивності;

- у бінарних сумішах вугілля К та ПС (КП, КС) при додаванні до марки К опіснюючих марок до 60-70 % тиск розпирання суміші вищий, ніж за правилом адитивності, а при подальшому збільшенні вмісту опіснюю-

чих марок тиск розпирання суміші нижчий, ніж за правилом адитивності.

Позитивний досвід складання вугільних шихт не тільки з урахуванням очікуваної якості коксу, але і з плануванням тиску розпирання (оскільки даний показник не підпорядковується правилу адитивності) є на КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» за даними [36]. На коксохімічному виробництві було проведено направлення даних щодо визначення тиску розпирання вугільних концентратів далекого зарубіжжя (США, Австралії, Канади, Колумбії), які використовуються на виробництві та на постійній основі введені до складу сировинної бази КХВ. Це дозволило: своєчасно вносити корективи до марочного складу шихт перед використанням у виробництво та знизити його від 5,9-4,8 кПа до 3,5-3,0 кПа; виключити випадки промислового використання небезпечної шихти із підвищеним тиском розпирання; виключити випадки буріння коксового пирога, пов'язані з марочним складом вугільних шихт.

Натомість, в дослідженні [34] автори зазначають, що тиск розпирання вугільних шихт підпорядковується закону адитивності. Розрахунковий тиск розпирання вугільних шихт рекомендовано прогнозувати на основі графіків зміни тиску розпирання вихідного вугілля. Причому наведено дані та графічні ілюстрації, які свідчать, що адитивність спостерігається не при максимальних або мінімальних значеннях тиску, а в кожній точці графіка.

В роботі [35] пропонується визначати тиск розпирання, використовуючи рівняння стану реального газу Редліха-Квонга, враховуючи компонентний склад парогазових продуктів, який залежить від природи вугілля (ступеню метаморфізму) та умов нагрівання. Так, зазначається, що за розрахунками максимальний тиск розпирання характерний для вугілля технологічних марок коксове К та піснучате спікливе ПС. Але рівняння громіздке, його використання ускладнене через необхідність визначати компонентний склад парогазових

продуктів для компонентів шихт, що не завжди можливо в умовах лабораторій коксохімічних підприємств.

Авторами [44] на підставі розроблених типів залежностей тиску розпирання в бінарних сумішах [45] запропонована схема розрахунку тиску розпирання багатоконпонентної суміші. Згідно методики спочатку необхідно визначати середньозважений тиск розпирання усередині кожної марки вугілля, що входить в шихту. При цьому тиск розпирання вугілля, що належить до однієї марки, незалежно від вугільного родовища, у бінарних сумішах підкоряється правилу адитивності. Потім обчислюється відносне відсоткове співвідношення вугілля необхідних марок в шихті. При введенні нового вугілля з невідомим тиском розпирання виникає необхідність готування експериментальних шихт і визначення їх тиску розпирання.

Використання ж запропонованих рівнянь (5-10) дає можливість прогнозувати тиск розпирання, оперуючи даними властивостей вугільних концентратів, які обов'язково визначаються на коксохімічному підприємстві для контролю якості сировини.

Висновки

Для збереження пічного фонду та отримання доменного коксу з необхідними якісними показниками при наявній сировинній вугільній базі придатні різні способи і прийоми, які дозволяють поліпшити ті або інші параметри якості основного продукту та забезпечити оптимальні умови експлуатації устаткування. Також треба враховувати, що впровадження технології коксування трамбованих шихт дозволяє залучити у більшому обсязі до сировинної бази підприємства більш дешеве і менш дефіцитне вугілля марок Г, ГЖ, КП, КС, які при шаровому коксуванні використовуються в обмеженій кількості. У свою чергу збільшення вмісту коксівного вугілля, яке сприяє розвитку високого тиску розпирання, потребує вивчення з подальшим моделюванням складів шихт, як для шарового коксування, так і коксування трамбованих шихт.

Отже, вивчення факторів впливу на формування величини тиску розпирання дає можливість планувати та відповідно корегувати компонентний склад виробничих вугільних шихт.

На підставі дослідження пластично-в'язких властивостей вугільних концентратів за методом Гізелера підтверджено зв'язок особливостей пластичного стану вугілля різного ступеню метаморфізму з тиском розпирання P_n , яке воно розвиває при коксуванні. Так, мінімальні значення P_n фіксували у вугілля марок ДГ, Г та ГЖ ($P_{нсер} = 2,5$ кПа), максимальні – у коксового та піснувато спіклого вугілля ($P_{нсер}$ становить від 7,9 до 25,3 кПа).

Розроблені регресійні рівняння для прогнозування тиску розпирання з урахуванням показника відбиття вітриніту, вмісту вітриніту, фюзенізованих компонентів, температури максимальної плинності та виходу

летких речовин шихти характеризуються високими коефіцієнтами кореляції r (0,89-0,90), що свідчить про їх статистичну значимість та можливість використання для прогнозування зазначеного показника.

Подальші дослідження будуть направлені на вивчення впливу тиску розпирання на фізико-механічні характеристики коксу.

Бібліографічний список

1. **Lyalyuk V.P.** Improving the technology of preparing coal for the production of blast-furnace coke under the conditions of multi-basin raw material base. Message 1. Optimizing the composition of coal batch by means of petrographic characteristics / **V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim, E.O. Shmeltser, I.A. Lyakhova** // *Petroleum and Coal*. – 2019. – Vol. 61(1). – P. 90-93.

2. **Lyalyuk V.P.** Improving the technology of preparing coal for the production of blast - Furnace coke under the conditions of multi-basin raw material base. Message 2. Optimizing the degree of crushing by means of petrographic characteristics of the batch / **V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim, E.O. Shmeltser, I.A. Lyakhova** // *Petroleum and Coal*. – 2019. – Vol. 61(1.) – P. 94-99.

3. **Shmeltser E.O.** Influence of the degree of mixing on the quality of preparation of coal batches / **E.O. Shmeltser, M.V. Kormer, E.V. Chuprinov, D.V. Miroshnichenko** // *Petroleum and Coal*. – 2023. – Vol. 65(2). – P. 525–532.

4. **Miroshnichenko D.** Preparation of oxidized coal / **D. Miroshnichenko, N. Saienko, Y. Popov, D. Demidov, Yu. Nikolaichuk** // *Petroleum and Coal*. – 2018. – Vol. 60(1). – P. 113-121.

5. **Miroshnichenko D.** Impact of oxidation on the expansion pressure of coal / **D. Miroshnichenko, Y. Kaftan, N. Desna, S. Pyshyev** // *Petroleum and Coal*. – 2017. – Vol. 59(1). – P. 62-66.

6. **Зеленський О.І.** Сучасні напрямки використання неспікливих добавок у виробництві коксу / **О.І. Зеленський** // *Вуглехімічний журнал*. – 2013. – № 3. – С. 21-28.

7. **Wojtaszek M.** The use of waste ion exchange resins as components of the coal charge for the production of metallurgical coke / **M. Wojtaszek, R. Wasielewski** // *Fuel*. – 2021. – Vol. 286 (119249). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119249>.

8. **Choudhury S.B.** Solvent-refined coal from high-ash non-coking coals and washery middlings for use in metallurgical coke making Part 1. Production, testing and characterisation // **S.B. Choudhury, B.B. Brahmachari, S.R. Dwivedi, A.K. Roy, P.K. Dasgupta, M. Chakraborty, R. Haque** // *Fuel Processing Technology*. – 1996. – Vol. 47 – P. 203-213. [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(96\)01010-7](https://doi.org/10.1016/0378-3820(96)01010-7).

9. **Zubkova V.** Investigation of influence of the additives of expired paracetamol (PR) and naproxen (NP) on the changes in volume of heated charge of a higher rank coal /

- V. Zubkova, A. Strojwas, M. Kaniewski, S. Ziomber // *Fuel*. – 2018. – Vol. 21(7). – P. 605–616. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117752>.
10. Mukina N.V. Coking of stamped coal charges. Part 1. Content of gas coals $\leq 40\%$ / N.V. Mukina, D.V. Miroshnichenko // *Coke Chem.* – 2021. – Vol. 64(6). – P. 237–245. <https://doi.org/10.3103/S1068364X21060041>.
11. Mukina N.V.; Miroshnichenko, D.V. Coking of stamped coal charges. Part 2. Content of gas coals $\geq 40\%$ / N.V. Mukina, D.V. Miroshnichenko // *Coke Chem.* – 2021. – Vol. 64(7). – P. 290–298. <https://doi.org/10.3103/S1068364X21070073>.
12. Васильєв Ю.С. Перша промислова коксова батарея з установкою термічної підготовки шихти в Україні як спосіб підвищення ресурсо- та енергоефективності металургійної галузі / Ю.С. Васильєв, А.І. Гордієнко, І.М. Лащенко [та ін.] // *Вуглехімічний журнал*. – 2010. – №3–4. – С.48–52.
13. Гордієнко А.І. Досвід освоєння та експлуатації дослідно-промислової установки термічної підготовки шихти на ВАТ «Ясинівський коксохімічний завод» / А.І. Гордієнко, В.А. Редін, Г.В. Долгарев, В.І. Чаленко, І.М. Вегеря // *Вуглехімічний журнал* – 2008 – №5–6 – С.22–25.
14. Nomura S. Recent developments in cokemaking technologies in Japan / S. Nomura // *Fuel Processing Technology*. – 2017. – Vol. 159. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.01.016>.
15. Васильєв Ю.С. Про вплив якості коксу отриманого з термічнопідготовлених шихт, які містять слабоспільні вугілля, на ефективність доменного процесу з використанням ПВП / Ю.С. Васильєв, А.І. Гордієнко, Г.В. Долгарев, Є.А. Юшков, В.М. Дудяк // *Вуглехімічний журнал*. – 2008. – №5–6. – С.38–40.
16. Vega M. F. Influence of the Heating Rate on the Quality of Metallurgical Coke / María F. Vega, Elvira Díaz-Faes, Carmen Barriocanal // *ACS Omega*. – 2021. – Vol. 6. – P. 34615–34623. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05007>.
17. Mangena S.J. Binderless briquetting of some selected South African prime coking, blend coking and weathered bituminous coals and the effect of coal properties on binderless briquetting / S.J. Mangena, V.M. du Cann // *International Journal of Coal Geology*. – 2007. – Vol. 71. – P. 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2006.11.001>.
18. Mangena S.J. The amenability of some Witbank bituminous ultra fine coals to binderless briquetting / S.J. Mangena, G.J. de Korte, R.I. McCrindle, D.L. Morgan // *Fuel Processing Technology*. – 2004. – Vol. 85. – P. 1647–1662. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.12.011>.
19. Sharma A.K. Influence of properties of bituminous binders on the strength of formed coke / A.K. Sharma, B.P. Das, P.S.M. Tripathi // *Fuel Processing Technology*. – 2002. – Vol. 75. – P. 201–214. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00257-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00257-0).
20. Thoms L.J. Physical characteristics of cold cured anthracite/coke breeze briquettes prepared from a coal tar acid resin / L.J. Thoms, C.E. Snape, D. Taylor // *Fuel*. – 1999. – Vol. 78. – P. 1691–1695. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00116-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00116-7).
21. Plancher H. Improving form coke briquette strength / H. Plancher, P.K. Agarwal, R. Severns // *Fuel Processing Technology*. – 2002. – Vol. 79. – P. 83–92. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00105-4).
22. Benk A. Phenolic resin binder for the production of metallurgical quality briquettes from coke breeze: Part II the effect of the type of the basic catalyst used in the resol production on the tensile strength of the formed coke briquettes / A. Benk, M. Talu, A. Coban // *Fuel Processing Technology*. – 2008. – Vol. 89. – P. 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.005>.
23. Scia'zko M. Kinetic modelling of coking coal fluidity development / M. Scia'zko, B. Mertas, L. Stepie'n // *J. Therm. Anal. Calorim.* – 2020. – Vol. 142. – P. 977–990. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09487-0>.
24. 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, A.K. Varma // *Int. J. Coal Sci. Technol.* – 2018. – Vol. 5. – P. 473–485. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0227-0>.
25. Kopeliovich L.V. Differences in the Coking Pressure of Coal / L.V. Kopeliovich // *Coke Chem.* – 2009. – Vol. 52. – P. 5–8. .
26. Pearson D.E. Encapsulites, and the suppression of internal gas pressure in industrial metallurgical coal blends / D.E. Pearson, R.A. Pearson, Y. Jiao, H.K. Park // *Fuel*. – 2017. – Vol. 200. – P. 545–554. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.002>.
27. Guelton N. Prediction of coke oven pressure / N. Guelton, T.V. Rozhkova // *Fuel*. – 2015. – Vol. 139. – P. 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.042>.
28. Sytnik A. Effect of expansion pressure of the coal blend in the process of coking on the refractory masonry of coke ovens / A. Sytnik, O. Zelenskii, A. Fidchunov, N. Desna, A. Grigorov // *Petroleum and Coal*. – 2019. – Vol. 61(6). – P. 1300–1306.
29. Strugała A. Mechanism of Coking Pressure Generation in the Light of the Results of Laboratory Tests / A. Strugała, A. Rozwadowski, T. Dziok // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. (2044). <https://doi.org/10.3390/en15062044>.
30. ДСТУ 8724:2017. Вугілля кам'яне та шихти на його основі. Метод визначення тиску розпирання, який виникає під час коксування. – [Чинний від 2018-01-01]. – К.: УкрНДНЦ, 2018. – IV, 12 с.

31. Довідник коксохіміка. В 6-ти томах. Том 1. Вугілля для коксування. Збагачення вугілля. Підготовка вугілля до коксування. / Під заг. ред. **Л.М. Борисова, Ю.Г. Шаповалова**. – Харків: ВД «Інжеек», 2010. – 536 с.
32. Правила технічної експлуатації коксохімічних підприємств. – Харків: 2017. – 272 с.
33. **Shen Y.** Speciation and thermal transformation of sulfur forms in high-sulfur coal and its utilization in coal-blending coking process: A review / **Y. Shen, Y. Hu, M. Wang, W. Bao, L. Chang, K. Xie** // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 35. – P. 70–82.
34. **Cherkasova T.** Study of the swelling pressure of coals and coal charges in the coking process / **T. Cherkasova, N. Krasulin, A. Nevedrov, A. Papin, S Subbotin** // *E3S Web of Conferences Clean Coal Technologies: Mining, Processing, Safety, and Ecology*. – 2021. – Vol. 303. (01053). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130301053>.
35. **Старовойт А.Г.** Про природу розвитку тиску коксування вугільного завантаження / **А.Г. Старовойт, А.С. Коверя** // *Вуглехімічний журнал*. – 2013. – №1. – С. 37-39.
36. **Мукіна Н.В.** Досвід впровадження лабораторної установки для визначення тиску розпирання вугілля та шихт на КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» / **Н.В. Мукіна, О.П. Черноусова, В.М. Кузніченко, О.В. Ситник** // *Вуглехімічний журнал*. – 2016. – №3-4. – С. 3-10.
37. ДСТУ 4096-2002. Вугілля буре, кам'яне, антрацит, горючі сланці та вугільні брикети. Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань. – [Чинний від 2003-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2002 – 34 с.
38. **ISO 1171-97.** Solid mineral fuels. Methods for determination of ash. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1997.
39. **ISO 589-81.** Hard coal—Determination of total moisture. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1981.
40. **ISO 7404-3-84.** Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite – Part 3: Method of determining maceral group composition. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1984.
41. **ISO 7404-5-85.** Methods for the petrographic analysis of coal – Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1985.
42. ДСТУ 7722:2015. Вугілля кам'яне. Метод визначення пластометричних показників. – [Чинний від 2016-08-01]. – К.: УкрНДНЦ, 2016. – III, 18 с.
43. **ISO-FDIS 13029 Coal – Determination of plastic properties – Constant-torque Gieseler plastometer method.** Technical Committee: ISO/TC 27/SC 5 ICS: 73.040, 2017.
44. **Кузніченко В.М.** Тиск розпирання вугілля та шихт в процесі коксування / **В.М. Кузніченко, І.В. Шульга, О.В. Ситник**. – Харків: Планета-Прінт, 2021. – 210 с.
45. **Ситник О.В.** Тиск розпирання при коксуванні бінарних сумішей вугілля насипним методом / **О.В. Ситник, В.М. Кузніченко, І.В. Шульга** // *Вуглехімічний журнал*. – 2011. – №1-2. – С.41-48.

Рукопис надійшов до редакції 02.10.2024

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-5-34-48

Specialty 161. U.D.C. 662.749.3

ASPECTS OF INFLUENCE ON THE VALUE OF COAL BLEND BURSTING PRESSURE AND METALLURGICAL PROPERTIES OF COKE. MESSAGE 1. FORMATION OF BURSTING PRESSURE DEPENDING ON THE PROPERTIES OF COAL CONCENTRATES

© **D.V. Miroshnichenko**, Doctor of Technical Sciences (National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine (NTU "KhPI")), **K.O. Schmeltser**, Ph.D. in Technical Sciences, **M.V. Kormer**, Ph.D. in Technical Sciences (State University of Economics and Technology, 16, Medychna str., Kryvyi Rih, 50005, Ukraine), **O.V. Sytnyk**, Ph.D. in Technical Sciences (State Enterprise "Ukrainian State Research Institute for Carbochemistry (UKHIN)", 7 Vesnina str., Kharkiv, 61023, Ukraine), **I.M. Avdeyuk** (NTU "KhPI")

It is shown that when forming the composition of coal charges for coking, it is necessary to solve not only the problem of producing metallurgical coke with high physical and mechanical characteristics, but also to ensure optimal operating conditions and preservation of the furnace stock, taking into account the bursting pressure of coal raw materials. The article defines the bursting pressure, i.e. the pressure exerted by a coal mass that has passed into a plastic state, provided that it is deprived of the ability to expand freely. The main reason for the development of the burst pressure is the pressure in the plastic layer of vapour-gas products of thermal decomposition of coal, which is transmitted through the semi-coke-coke to the refractory wall of the heating wall of the coking chamber, causing its deflection.



Based on the study of the plastic-viscous properties of coal concentrates by the Gisel method, the connection between the peculiarities of the plastic state of coal of different degrees of metamorphism and the bursting pressure (P^b), which it develops during coking, was confirmed. The minimum values of P^b were recorded for coals of grades DG, G, and GZh ($P^b_{av} = 2.5$ kPa), the maximum values were recorded for coking and low-sintering coals (P^b_{av} from 7.9 to 25.3 kPa).

The correlation between the bursting pressure and genetic and technological properties of coal raw materials (volatile matter yield and vitrinite reflectance) was established. The regression equations for predicting the bursting pressure were developed taking into account the vitrinite reflectance, vitrinite and fuseness content, maximum fluidity temperature and volatile matter yield of the charge. The developed equations are characterized by high correlation coefficients r (0.89-0.9), which indicates their statistical significance and the possibility of using them to predict this indicator. The use of the proposed equations makes it possible to predict the bursting pressure using the data on the properties of coal concentrates, which must be determined at a coke plant to control the quality of raw materials.

Keywords: bursting pressure, plastic-viscous properties, component composition, petrographic characteristics, volatile yield.

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

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-5-48-60

Спеціальність 161. УДК: 628.483

НОВІ ІЗОЛЯЦІЙНІ ВУГЛЕВОДНЕВІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЗАХИСТУ НАФТО- ТА ГАЗОПРОВІДІВ ВІД КОРОЗІЇ

© А.Я. Гаїпов¹, А.Б. Григоров²

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

¹ Гаїпов Амангелди Язмурадович, аспірант кафедри технології переробки нафти, газу та твердого палива (ТПНГтаТП), e-mail: aman_8600@gmail.com

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

В статті наведено огляд джерел, присвячених питанню пасивного захисту від корозії газо- та нафтопроводів шляхом нанесення на їх поверхню покриттів, представлених ізоляційними вуглеводневими матеріалами (ІВМ). Сформульовані основні вимоги до їх властивостей, відповідність яким гарантує ефективний захист металевої поверхні труб, що сприяє забезпеченню їх надійності при експлуатації. Проаналізовано ефективність застосування та основні недоліки кожного з ІВМ які нині досить широко застосовуються у промисловості України. На підставі цього обрано основний напрямок наукових досліджень, пов'язаних зі створенням нових ІВМ, що будуть характеризуватися високим рівнем експлуатаційних властивостей та низькою вартістю, а їх виробництво сприятиме покращенню екологічної ситуації в країні. Таких результатів можна досягти, використовуючи у якості сировини для технологічного процесу виробництва ІВМ вторинної сировини – відходів виробництва та споживання. Запропоновано універсальну формулу ізоляційних вуглеводневих матеріалів, яка включає в себе вуглеводневу основу, модифікатор цієї основи та активуючу речовину. З огляду на це, в якості найбільш перспективних компонентів ІВМ з числа вторинної сировини обрано: для вуглеводневої основи – відпрацьовані нафтопродукти, нафтовий шлам, кислі гудрони, смолисто-асфальтенові речовини, некондиційні продукти нафтопереробки та коксохімічного виробництва; для модифікаторів – полімери, целюлозу, гуму, вуглеводневі розчинники; для активуючих речовин – солі вищих первинних, вторинних та третинних аліфатичних амінів, амідоміни, чотиризаміщені амонієві основи, вищі карбонові кислоти, солі (мила) важких та лужноземельних металів вищих карбонових кислот. Згідно з формулою ІВМ представлено алгоритм

визначення та підбору сировини, що дозволяє реалізувати системний підхід до розробки нових високоефективних видів матеріалів для захисту газо- та нафтопроводів.

Ключові слова: трубопроводи, корозія, ізоляційні вуглеводневі матеріали, захисні покриття, вторинна сировина, нафтопродукти, кам'яновугільний пек, полімери, гумова крихта, смолисто-асфальтенові речовини.

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

Надійна та безперебійна експлуатація газо- та нафтопроводів в цілому визначається їх здатністю протидіяти негативному впливу навколишнього середовища, який проявляється у вигляді корозійних процесів. Інтенсивність цих процесів залежить від таких факторів, як температура, вологість, якість металу, наявність контакту між металевою поверхнею та киснем повітря або корозійно-агресивними речовинами, тощо. Запобігти або значно уповільнити корозійне руйнування газо- та нафтопроводів можна за рахунок використання різних засобів захисту, одним з яких є нанесення на металеву поверхню захисних покриттів, представлених, зокрема, ізоляційними вуглеводневими матеріалами (ІВМ). Матеріали, що використовуються для захисту газо- та нафтопроводів визначаються на стадії проектування мережі та наносяться на поверхню труб при їх виробництві або безпосередньо при монтажі труб та обладнання. Цей вид захисту належить до пасивних, але дуже добре зарекомендував себе під час тривалої експлуатації трубопроводів різного функціонального призначення.

Для ефективного захисту металевої поверхні труб, захисні матеріали повинні відповідати наступним вимогам [1]:

1. Бути безпечними при застосуванні;
2. Мати високі захисні властивості;
3. Характеризуватися мінімальним водопоглиненням;
4. Характеризуватися високими адгезійними властивостями по відношенню до металевої поверхні труб;
5. Бути теплостійким та морозостійким;
6. Зберігати цілісність покриття;
7. Характеризуватися рівномірністю нанесеного шару;
8. Володіти високими діелектричними властивостями;
9. Не чинити корозійний вплив на металеву поверхню труби;
10. Не змінювати свої властивості протягом тривалого часу тобто бути стійким до «старіння».

Задовольняють зазначеним вище вимогам ІВМ, наведені на рис. 1., що в остаточному підсумку і призвело до їх найбільшого поширення у промисловості для захисту металевої поверхні газо- та нафтопроводів.

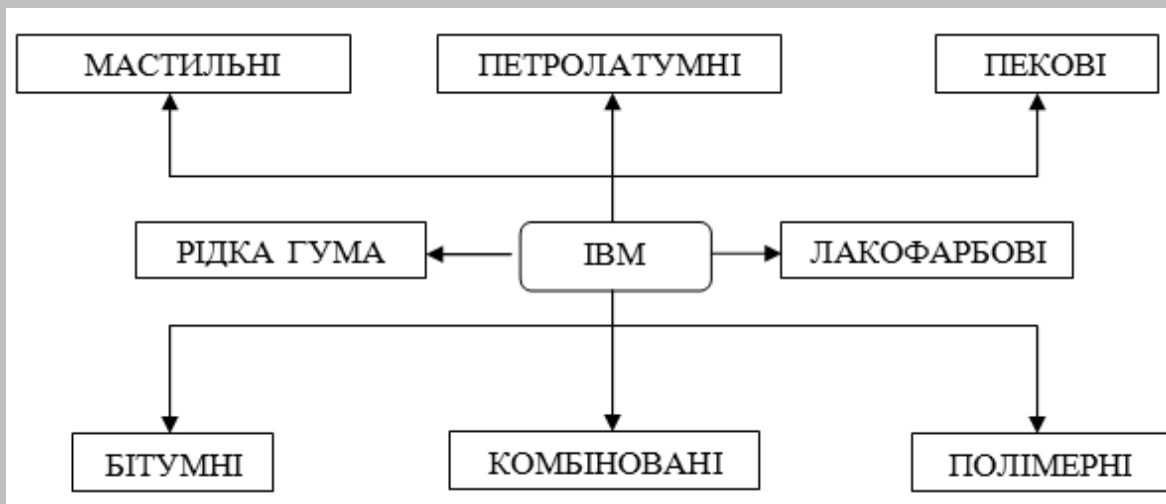


Рис. 1 Види ІВМ

Бітумні матеріали. Бітумні матеріали (бітуми та бітумні мастики) використовується в якості обмазувальної ізоляції металевих поверхонь газо- та нафтопроводів. Цей матеріал займає лідируючі позиції на ринку ІВМ України.

Для ізоляції трубопроводів від ґрунтової корозії, для гідроізоляції елементів конструкцій та споруд, розташованих над та під землею; захисту комунікацій від ґрунтових вод; ізоляції та антикорозійної обробки резервуарів, газопровідних, нафтопровідних та інших трубопроводних мереж; а також для реконструкції дефектів основної ізоляції досить тривалий час використовується нафтовий бітум БНІ-ІV (див. табл. 1).

Досить часто бітумні матеріали використовують у вигляді бітумних мастик [3]. Основою для цих мастик служить нафтовий будівельний бітум – продукт окиснення нафтових залишків [4]. Для надання експлуатаційних властивостей в цей бітум можуть додаватися розчинники, воду (бітумно-емульсійна мастика), різні органічні речовини та мінеральні добавки. Так, наприклад, при додаванні до будівельного бітуму нафтового розчинника отримують ґрунтовку, яка після її нанесення на металеву поверхню трубопровода утворює тонку плівку, що заповнює нерівності металеві поверхні та створює умови для високої адгезії основного шару бітумної мастики.

Таблиця 1

Характеристика ізоляційного бітуму БНІ-ІV [2]

Показник	Величина показника
Температура розм'якшення, °С	65
Глибина проникнення голки при 25°С, мм-1	35
Температура спалаху, °С, не нижче	250
Дуктильність при 25°С, см	4,0
Масова частка водорозчинних сполук, %	0,2
Зміна маси після прогріву, %	0,5
Водонасичення за 24 год, %	0,1

Досить часто в промисловості використовують бітумно-емульсійні мастики рідкої консистенції, призначені для попередньої обробки перед гідроізоляцією поверхні [5]. Бітумні мастики можуть бути що холодного, то і гарячого застосування. Основою мастик холодного застосування є водна емульсія або органічний розчинник. Нанесення мастик гарячого застосування передбачає їх попередній розігрів. Перевагою бітумних мастик в порівнянні з рулонної гідроізоляцією є монолітна еластичність і відсутність швів на поверхні покриття. Позитивною відмінною мастик холодного застосування від гарячого є їх пожежобезпечність. Також знижуються енерговитрати при переробці і трудовитрати, оскільки цей матеріал відзначається зручністю роботи з поверхнями різної складності та конфігурацій. В залежності від кількості та товщини шарів мастики розрізняють бітумні покриття нормального типу (загальна товщина покриття до 4 мм) і посиленого типу (загальна товщина покриття до 6 мм).

Основним недоліком цих ІВМ є їх схильність до старіння та відсутність можливості застосування як самосійного покриття. В даний час бітумні мастики в основному використовуються в складі комплексних ізоляційних покриттів, що складаються з декількох шарів: ґрунтовки, мастики, армуючої і захисної обкладки. Для захисту шару бітумної мастики від механічних пошкоджень вона вкривається захисною обгорткою [6].

Полімерні матеріали представлені плівками. Як основа полімерних ізоляційних стрічок використовують пластифікований полівінілхлорид (ПВХ) і поліетилен (ПЕ). До позитивних характеристик ПЕ можна віднести його доступність, стійкість до дії хімічних реагентів (кислот, лугів та розчинів солей), еластичність, нерозчинність у воді і багатьох відомих розчинниках, діелектричні властивості. Основними недоліками виступають: низька адгезія, необоротні деформації під навантаженням, проникність для кисню. В результаті процесу «старіння» ПЕ згортається, розтріскується, втрачає свою міцність та захисні властивості.

Покриття з полімерних ізоляційних стрічок представляють собою багатошарові системи, що складаються з плівки-основи, підклеювального шару і шару адгезійного матеріалу [7].

Іноді використовують покриття з екструдованого поліетилену. Цей вид ізоляції застосовується лише в заводських умовах. Ізоляційне покриття на основі екструдованого поліетилену може бути двошаровим (сополімер етилену з вінілацетатом + розплав поліетилену), а також трьохшаровим (сумісне використання порошкового епоксидного матеріалу, сополімеру етилену з вінілацетатом та розплав поліетилену). Сополімер етилену з вінілацетатом (Севілен) використовується як адгезійний шар з характеристиками, що забезпечують адгезію на рівні 3,5 кгс/см [8].

Ще один тип захисного полімерного покриття – це епоксидні покриття [9]. Для створення ізолюючого покриття використовують порошок, який наноситься розпилювачами в електростатичному полі. Епоксидний порошок – це суміш епоксидної смоли, затверджувача, пігменту, наповнювачів, тиксотропної та поверхнево-активної добавки. Основним недоліком цього покриття є підвищена дифузія водяного пара, яка в 5-10 разів перевищує ці показники для ПЕ. Тому при виборі епоксидних покриттів для захисту трубопроводу необхідно враховувати умови експлуатації (склад ґрунту, температуру, кількість осадків і т. п.) [10]. Для ремонтних робіт, пов'язаних із заміною ізоляції трубопроводів, що знаходяться в експлуатації, епоксидні покриття малопридатні, так як вимагають високого ступеня очищення поверхні трубопроводів перед нанесенням. Підтримувати необхідні технологічні параметри нанесення покриття в трасових умовах дуже важко.

До полімерних матеріалів слід також віднести і поліуретанові покриття, котрі характеризуються високою адгезією, цілісністю покриття, міцністю при ударі, високим питомим опором, малим катодним відшаруван-

ням і вологопоглинанням, монолітністю [11, 12]. Такі покриття наносяться на поверхню труби шляхом наплення. Тому немає проблем ізоляції стиків, фасонних деталей, арматури тощо. Як правило, вони застосовуються для особливих умов експлуатації, так як мають високу вартість. Ці покриття рекомендуються для високих температур перекачуваного продукту (до 80 °С), фасонних деталей та ін. [13].

Мастильні матеріали. Їх використовують вкрай рідко, зазвичай лише в умовах низьких температур півночі. В Україні мастильні матеріали використовують виключно для змащення запірної арматури трубопроводів та герметизації різьбових з'єднань. Спеціальні мастильні матеріали виконують свої функції в умовах, близьких до екстремальних. Для нормального функціонування арматури необхідно забезпечити легкість ходу її деталей. При цьому однією з вимог, що висувається до пристроїв, які експлуатуються в енергетичній галузі, є надійність спрацювання після тривалого простою. В табл. 2 представлено характеристику деяких мастильних матеріалів, які використовуються в енергетичній галузі України.

Таблиця 2

Характеристика високотемпературних мастильних матеріалів [14]

Назва матеріалу	Основний мастильний компонент	Носій / сполучний компонент	Верхня межа робочих температур, °С	Навантаження зварювання, Н
Molykote G-Rapid Plus	Дисульфід молібдену	Мінеральна олива	+450	5300
Molykote 1000	Мідь, графіт	Мінеральна олива	+650	4800
Molykote Cu-7439 Plus	Мідь	Мінеральна олива, ПАО	+650	2500
Molykote P-40	Композиція білих твердих мастил	Мінеральна олива, ПАО	+1200	3000
Molykote P-37	Діоксид цирконію, графіт	Мінеральна олива	+1400	4000
Molykote P-74	Графіт	ПАО	+1500	4800
Molykote 3400A Leadfree	Дисульфід молібдену	Епоксидна смола	+430	16000
Molykote D-321R	Дисульфід молібдену, графіт	Полібутил-титанат	+450	12500

Матеріали на основі кам'яновугільних пеків. Кам'яновугільні пеки є невикипаючими залишками перегонки (ректифікації) кам'яновугільної смоли. Пек представляє собою тверду масу чорно-коричневого кольору, що при нагріванні переходить у в'язко- чи рідкоплинний стан (залежно від марки). Загалом кам'яновугільні пеки проявляють фізико-хімічні властивості переохолоджених рідин, полімерів та дисперсних систем. Вони містять значну кількість конденсованих ароматичних сполук широкого діапазону молекулярної маси, що зумовлює високі адгезійні та в'язучі властивості даних матеріалів, а також їх водостійкість і низку інших корисних (у дечому – унікальних) техно-

логічних властивостей. За своїми фізико-хімічними характеристиками марки кам'яновугільних пеків, які виробляються в Україні, повинні відповідати вимогам ДСТУ 8389:2015. Мастики на основі кам'яновугільних пеків характеризуються високою стабільністю експлуатаційних показників протягом тривалого часу. Суттєвим недоліком покриттів на основі пеків є їх канцерогенність, що значно обмежує сфери застосування. Ефективно знизити канцерогенність кам'яновугільного пеку без суттєвого погіршення його цінних технологічних властивостей не видається можливим [15]. В табл. 3 представлені деякі характеристики кам'яновугільних пеків [16].

Таблиця 3

Характеристика пеків

Показник	Марка пеку	
	B	B1
Температура розм'якшення, °C	85	72
Вихід легких речовин, %	53,8	59,0
Масова частка речовин, нерозчинних в хіноліні, %	10,5	8,2
Масова частка речовин, нерозчинних у толуолі, %	33,2	28,2
Зольність, %	0,11	0,13
Масова частка води у твердому пеку, не більш %	4,0	

Матеріали на основі петролатуму. Петролатумна мастика – м'яка герметизуюча маса холодного нанесення на основі петролатуму і технологічних добавок для заповнення пустот і вирівнювання дефектів поверхонь на конструктивних елементах трубопроводів і різного заводського обладнання. Температурні умови експлуатації петролатумних матеріалів лежать у межах від -60 до +80 °C. Такі мастики додатково можуть містити інертні кремнієві наповнювачі та рослинні волокна. Петролатумні мастики експлуатуються в ґрунтах з високою вологістю і на підводних переходах. Вони

застосовуються з додатковою обгорткою з полімерних або тканинних стрічок і в такому вигляді характеризуються високими значеннями електричного опору. Наносять їх на чисту і суху поверхню в один або два шари. Досить часто поверхню першого шару після його висихання на трубі обмотують склотканиною, потім покривають її ще одним шаром мастики і тільки після цього намотують зовнішню обмотку. В табл. 4 наведено характеристики мастики Petrolatum Mastic for Pipe The Flange Valve Hole Bend.

Таблиця 4

Характеристики мастики Petrolatum Mastic for Pipe The Flange Valve Hole Bend [17]

Показники	Значення показників
Колір	Зелений, коричневий
Густина, км/м ³	1,40
Питомий об'єм, см ³ /см	720
Температура спалаху, °C	>180
Температурні межі використання, °C	0-55
Максимальна температура використання, °C	100

Матеріали на основі рідкої гуми. Ці матеріали є гідроізоляційним покриттям, що наноситься методом безповітряного напилення, практично миттєво набуває до 80 % міцності і створює монолітне безшовне покриття, заповнюючи усі шви, пори та мікротріщини в основі, чим забезпечує повну водо-, паро-, і газонепроникність.

До основних переваг цього покриття можна віднести:

- тривалий термін експлуатації;
- збільшення міжремонтного періоду і легкість ремонту;
- висока адгезія то металевій поверхні труб;
- високі захисні властивості;
- відсутність необхідності супутніх захисних матеріалів;
- широкий діапазон температур експлуатації (від -70 до + 90 °C).

- висока в'язкість;
- стійкість до пробиття та проколів;
- відсутність токсичності, екологічна безпека;
- горючість помірної типу (група горючості Г2);
- відсутність катодного відшарування;
- стійкість до впливу озону.

Рекомендована товщина гідроізоляції рідкою гумою становить від 1,0 до 1,5 мм. До недоліків цього покриття можна віднести високу вартість, відсутність у багатьох марок рідкої гуми стійкості до впливу ультрафіолетових променів, необхідність попередньої обробки металевій поверхні спеціальними засобами. В табл. 5 наведено характеристики рідкої гуми IMPERMEABILIZANTE E-88 яка досить часто використовується в Україні для гідроізоляції різних промислових споруд.

Характеристика рідкої гуми IMPERMEABILIZANTE E-88 [18]

Показник	Величина показника
Час висихання, год.	8
Водопоглинення за 24 години, %	1
Температурні межі застосування, °С	-40 до +130
Подовження на розрив (при 20 °С), %	300
Водопроникність, кг/см	
Позитивний тиск	9
Негативний тиск	7
Прогнозований термін використання, рік	15

Лакофарбові матеріали. Вони знайшли широке застосування для антикорозійного захисту металевих поверхонь різного промислового обладнання: трубопроводів, димових труб, резервуарів, відстійників тощо. До переваг цього типу покриттів слід віднести їх доступність, широкий спектр властивостей, вони мають просту технологію нанесення на поверхню, легко відновлюються у разі пошкодження, відрізняються різноманітністю зовнішнього вигляду та кольорів. До числа суттєвих недоліків можна віднести: необхідність складної підготовки металевої поверхні до нанесення, високу вартість, схильність до сколів при ударах. Ефективність застосування цих покриттів обмежується терміном експлуатації до 10 років і швидкістю корозії металу до 0,05 мм/год [19].

Існує окрема лінійка лакофарбових покриттів, стійких до дії різних нафтопродуктів: бензину, керосину, технічних і білих медичних олів, мастил, змащувально-охолоджувальних рідин. Вони використовуються як для захисту металевих (сталь, алюміній), так і не металевих (полімерних) поверхонь. Представником покриттів цього типу є емаль АКВАХІМ ЕПМ Ral 7035 – двокомпонентна епоксидно-поліуретанова емаль з добавками мелаїно-формальдегідної смоли, пігментів, диспергаторів, інгібіторів корозії та пластифікаторів (може комплектуватися алюмінієвою пудрою). Вона використовується для захисту від корозії сталевих конструкцій, що експлуатуються в атмосферних умовах і при підвищеній вологості, ємностей для зберігання нафтопродуктів, трубопроводів, обладнання в умовах дії агресивних середовищ (мінеральних кислот, лугів, солей, агресивних газів та інших хімічних реагентів) [20].

Комбіновані матеріали. Використання таких матеріалів в якості захисного покриття є найбільш перспективним, бо поєднує в собі позитивні властивості різних видів компонентів (матеріалів), які присутні в їх складі. Ці покриття представлені головним чином бітумно-полімерними мастиками – сумішками будівельного бітуму з полімерними смолами. Подібна комбінація дозволяє значно підвищити термін служби і якість покриття. Наразі для модифікації бітумних матеріалів ви-

користують пластомери та термопластичні еластомери: поліетилен (PE), поліпропілен (PP), етиленвінілацетат (EVA), етилен-бутил-акрилат (EBA), стирол-бутадієн-стирол (SBS), стирол-ізопрен-стирол (SIS) і стирол-етилен/бутилен-стирол (SEBS) [21-23]. Доведено, що модифікація бітумів бутадієном, етиленпропіленом, бутил-ізопреном, дозволяє отримати матеріал з підвищеною еластичністю, пластичністю, гідрофобністю, стійкістю до впливу навколишнього середовища [24]. Отримати покриття для захисту металевих конструкцій від корозії в роботах [25, 26] пропонується шляхом модифікування бітуму епоксидною смолою ELM-NG900Z і затверджувачем у загальному співвідношенні 1,0:5:1,5 відповідно.

Хоч усі наведені вище полімери певною мірою покращують властивості бітуму, все ще є деякі недоліки, які обмежують майбутній розвиток полімерної модифікації бітуму: висока вартість, низька стійкість до старіння, низькі адгезія та стабільність при зберіганні полімер-модифікованого бітуму (PMB). Зазначені недоліки усувають шляхом вулканізації сіркою, додаванням антиоксидантів, використанням гідрофобних глинистих мінералів, функціоналізацією та застосуванням реакційноздатних полімерів. Однак все це, в свою чергу, дуже ускладнює та підвищує вартість виробництва.

Окремим рядом серед комбінованих матеріалів стоять бітумні матеріали, що модифікуються гумою – мастики бітумно-гумові (МБГ) та бітумно-каучукові (МБК). Для модифікації бітумів використовують каучук, котрий сприяє підвищенню еластичності модифікованого бітуму, забезпечує його високу твердість та тугоплавкість [27, 28]. Такі мастики окрім гуми містять різні наповнювачі та полімерні добавки. Представниками такого типу комбінованих покриттів, що виробляється в Україні, є мастики РБВ-25, РБВ-35, РБВ-50 та МБК-Г (див. табл. 6-7), що є багатокомпонентними сумішками, які окрім бітуму містять наповнювачі, модифікуючі полімерні добавки та пластифікатори. Подібні мастики використовуються для ізоляції підземних сталевих трубопроводів та інших споруд з метою захисту від ґрунтової корозії.

Таблиця 6

Технічні характеристики мастик РБВ-25, РБВ-35 та РБВ-50 [29]

Показник	Значення показника
Температура розм'якшення, °С	180±10
Теплостійкість, °С	160
Потужність зчеплення з бетоном, МПа кгс/см ² , не менше	0,5/5,0
Вологопоглинання протягом 24 годин, %, не більше	1,5
Гнучкість при температурі -25°С для РБВ-25 -35°С для РБВ-35 -50°С для РБВ-50	не має бути тріщин

Таблиця 7

Технічні характеристики мастики МБК-Г [30]

Показник	Значення показника
Зовнішній вигляд	Тверда, однорідна маса
Температура розм'якшення, °С	90
Теплостійкість протягом 5 год., °С	100
Вологопоглинання протягом 24 годин, %, не більше	1,5
Гнучкість при температурі 18±2 °С, не має бути тріщин на стрижні діаметром, мм	15

Нині досить перспективним напрямком у виробництві комбінованих покриттів видається використанням в якості сировини різних видів відходів. Такий підхід є основою для впровадження циркуляційної економіки, яка діє в багатьох країнах Європейського Союзу [31].

Використання вторинної сировини (відходів виробництва та споживання) є економічно доцільнішим шля-

хом створення нових ізоляційних вуглеводневих матеріалів з високим потенціалом захисних властивостей та порівняно низькою вартістю. Так, в якості вуглеводневої основи для таких матеріалів (покриттів) треба використовувати відходи нафтохімічної промисловості України (див. рис. 2); в якості модифікуючих добавок – промислові та побутові відходи (див. рис. 3).



Слід відзначити, що представлена на рис. 3 вуглеводнева основа в своєму складі містить або смолисто-асфальтенові речовини, або активні елементи, які мають зумовлювати високі адгезійні та захисні властивості матеріалів отриманих на їх основі.

Відпрацьовані нафтопродукти. Цей вид вуглеводневої основи представлений виключно відпрацьованими змащувальними матеріалами (рідкими оливами та консистентними мастилами) різного функціонального призначення. Відомо, що під час заміни відпрацьованих змащувальних матеріалів в їх складі знаходиться до 5 % смолисто-асфальтенових речовин та залишається до 30 % від початкового потенціалу присадок, що може бути використане як позитивне явище при виробництві ізоляційних матеріалів на їх основі. Причому, в наслідок значного вмісту антикорозійних і антиокислювальних присадок, особливо цінною сировиною серед рідких олив можна вважати моторні та трансмісійні оливи, а серед консистентних мастил – протизносні та консерваційні. Зазначимо, що в Україні щорічно утворюється сотні тисяч тон цих матеріалів, тому вони можуть розглядатися як перспективна сировина для промислового виробництва ізоляційних матеріалів.

Нафтовий шлам. Нафтовий шлам належить до наймасовіших відходів, що утворюються при виробничих процесах видобування та переробки нафти. Вихід нафтових шламів на нафтопереробних заводах варіюється від 1 до 5 кг/т нафти, що переробляється. Це важкі нафтові залишки, що містять у середньому 10-50 % вуглеводнів, 30-85 % води та 10-30 % твердих домішок. Шлам утворюється в сировинних та товарних резервуарах, відстійниках, трубопроводах та іншому промислового та заводському обладнанні. Після обробки нафтового шламу в триканторах з нього виділяють вуглеводневу частину, воду та механічні домішки [32]. В подальшому вуглеводнева частина, що містить значну кількість смолисто-асфальтенових речовин (20-40 %), які характеризуються високими адгезійними властивостями, може бути використана в якості вуглеводневої основи для виробництва ізоляційних матеріалів.

Кислі гудрони – відходи, які утворюються при контактному очищенні нафтопродуктів (наприклад, змащувальних рідких олив) концентрованою сірчаною кислотою. Кислі гудрони є смолоподібними високів'язкими масами різного ступеню рухливості, що містять різноманітні органічні сполуки, зокрема значну кількість (до 60 %) смолисто-асфальтенових речовин, а також від 15 до 70 % пов'язаної та вільної сірчаної кислоти, золу та воду [33]. На підприємствах нафтохімічної та нафтопереробної галузі України щорічно утворюється приблизно 250-300 тис. т. цього продукту.

Нині в наслідок слабого розвитку технологій їх переробки, кислі гудрони накопичують у ставках-накопичувачах, які займають величезні площі та є активними джерелами забруднення навколишнього середовища. Після очищення кислих гудронів від сірчаної кислоти шляхом обробки різними реагентами (наприклад, гідроксидом кальцію) вони можуть використовуватися при виробництві ізоляційних матеріалів виключно для захисту від корозії сталевих труб газо- та нафтопроводів.

Смолисто-асфальтенові речовини – це суміші високомолекулярних (молекулярна маса від 2000 до 4000 од.) сполук, які складаються з конденсованих циклічних структур, що містять нафтеніві, ароматичні і гетероциклічні кільця з декількома боковими аліфатичними ланцюгами. Присутність смолисто-асфальтових речовин у паливах, оливах та мастилах небажана. Вони погіршують колір, збільшують нагароутворення. Також смолисто-асфальтові речовини отруюють каталізатори, викликають закоксовування апаратури при переробці нафти. У той самий час смолисто-асфальтові речовини характеризуються високими захисними та адгезійними властивостями, котрі можна використати при виробництві ізоляційних матеріалів. Основним джерелом утворення смолисто-асфальтенових речовин на нафтопереробних підприємствах є процеси селективної очистки оливних вакуум-дистилятів пропаном, фурфуролом, ксилолом, фенолом тощо [34].

Некондиційні продукти – це нафтопродукти та продукти коксохімічного виробництва, які не відповідають вимогам нормативно-технічної документації. Така невідповідність зумовлюється або порушеннями у технологічному режимі їх виробництва, або потраплянням до їх складу різних видів забруднень при зберіганні, перекачуванні та транспортуванні. Зрозуміло, що для подальшого використання такі продукти повинні пройти процес очищення, який досить часто є економічно недоцільним з огляду на кінцеву вартість очищеного нафтопродукту. В цьому випадку раціональним підходом є його безпосереднє використання в якості вуглеводневої основи для виробництва ізоляційних матеріалів. В наслідок хімічного складу і зумовлених ним властивостей, найбільш перспективними продуктами можна вважати пеки, мазути та гудрони.

Розглядаючи потенційні модифікуючі добавки до вуглеводневої основи, які представлені на рис. 3, відзначимо, що вони підбиралися з огляду на доступність на ринку України, низьку вартість, сумісність з вуглеводневою основою та здатністю поліпшувати її експлуатаційні властивості.



Полімери належать до багатотоннажних промислових та побутових відходів, які підлягають обов'язковій утилізації. Насьогодні в технологіях рециклінгу задіяно не більше 30 % від загальної кількості утворених полімерних відходів [35]. Тобто основні обсяги полімерних відходів накопичуються на полігонах і сміттєзвалищах, чекаючи своєї черги на утилізацію, що робить їх дешевою та доступною сировиною для багатьох технологічних процесів, – зокрема для виробництва ізоляційних матеріалів. Зазначимо, що модифікування вуглеводневої основи дозволяє отримати ізоляційний матеріал з високою теплостійкістю, гарною гнучкістю на холоді, високою стійкістю до атмосферних впливів та механічною міцністю. В якості полімерних модифікаторів можна використовувати подрібнені тверді відпрацьовані полімерні вироби з поліетиленів (HDPE, LDPE), поліпропілену (PP) та полістиролу (PS). Ці представники поліолефінів належать до багатотоннажних побутових відходів (загальна кількість у полімерних відходах складає біля 50 %), які дуже технологічні, тобто характеризуються високою здатністю до термічної та термодеструктивної переробки. Також, в якості модифікуючої добавки можна використовувати полівінілхлорид (PVC) [36], доля якого в загальній кількості полімерних відходів складає біля 15 %. Однак його термічна переробка пов'язана з розкладанням та утворенням хлористого водню, що значно ускладнює практичне застосування при виробництві ізоляційних матеріалів. Також, внаслідок своїх властивостей, зокрема теплостійкості та хімічної інертності, такий полімер, як поліетилентерефталат (PET), на відміну від бітумних матеріалів [37], не може виступати модифікуючою добавкою до вуглеводневої основи. Але при цьому він може використовуватися

в поєднанні з іншими добавками як самостійний ізоляційний матеріал.

Целюлоза – це органічна сполука, вуглевод, полісахарид з формулою $(C_6H_{10}O_5)_n$. Вона зустрічається у відходах виробництва харчової продукції, переробки деревини, також дуже часто вона представлена відпрацьованою пакувальною тарою. Хоча целюлоза повністю задіяна у технологіях рециклінгу, її також можна розглядати як можливий модифікатор для вуглеводневої основи. Це зумовлено тим, що елементарна ланка целюлози містить три гідроксильні групи: одна первинна (у шостого атома вуглецю), дві – вторинні (у другого та третього атомів вуглецю). Гідроксильна група у другого вуглецевого атома має підвищені кислотні властивості і найбільш реакційноздатна в лужних середовищах. Менш реакційноздатною є гідроксильна група у третього вуглеводневого атома. Первинна гідроксильна група у шостого вуглецевого атома відрізняється підвищеною реакційною здатністю, що може бути використане як при модифікуванні власне целюлози, так і вуглеводневої основи целюлозою. Целюлозу, як і полімери, завдяки її фізико-хімічній взаємодії з вуглеводневою основою, можна розглядати в якості структуральної добавки, що має забезпечувати механічну міцність ізоляційного матеріалу.

Гума у вигляді подрібнених відпрацьованих автомобільних шин відноситься до числа найперспективніших модифікуючих добавок. По-перше, цей вид відходів характеризується значними запасами (переробляється лише 8,3 % від загальної кількості) [38]. По-друге, цей відход має широке застосування в технології модифікування складних вуглеводневих систем нафтового походження [39]. Механізм модифікуючої дії гумової крихти на вуглеводневу основу пов'язаний з її здатніс-

тю набухання та розчинення в оливах. Тобто, ця модифікуюча добавка є перспективною при її використанні в відпрацьованих та некондиційних нафтопродуктах. Додавання до цих видів вуглеводневої основи подрібненої гумової крихти дозволить значно підвищити адгезійні властивості, моростійкість та еластичність отриманого ізоляційного матеріалу.

Вуглеводневі розчинники. Розчинники виступають пластифікаторами вуглеводневої бази. Тобто, їх введення дозволяє значно розширити низькотемпературний діапазон роботи ізоляційного матеріалу. Зазвичай вміст розчинників в матеріалі не перевищує 10 %. Використання розчинників дозволяє застосовувати ізоляційне покриття не лише в заводських умовах виробництва труб, а й при їх монтажі в польових умовах. З урахуванням властивостей вуглеводневої основи, розчинники доцільно використовувати у кислих гудронах, нафтовому шламі, некондиційних нафтопродуктах та продуктах коксохімічного виробництва, смолисто-асфальтенових речовинах. Також, їх можна застосовувати при виробництві полімерного покриття з ПЕТ. На сьогоднішній день, залежно від в'язкості вуглеводневої

основи та бажаних властивостей ізоляційного матеріалу, в якості розчинників використовують: некондиційні нафтові розчинники та моторні палива, відпрацьовані оливи, вуглеводневі фракції піролізу полімерної сировини та відпрацьованих автомобільних шин.

Іноді до складу ізоляційних матеріалів можна вводити активуючі речовини. До цих речовин можна віднести катіонні та аніонні поверхнево-активні речовини (ПАР). Катіонні ПАР представлені солями вищих первинних, вторинних та третинних аліфатичних амінів, амідоамінами, чотиризаміщеними амонієвими основами. Аніонні – вищими карбоновими кислотами, солями (милами) важких та лужноземельних металів вищих карбонових кислот, тощо. В якості ПАР також використовують синтетичні смоли з великим вмістом активних груп. Зазвичай катіонні ПАР вводять у кількості 0,5-5,0 %, аніонні – 3,0-12,0 %. Добавки ПАР здатні підвищувати міцність покриття та його адгезійні властивості, що є особливо важливим при використанні в ізоляційному покритті таких модифікаторів, як тверді подрібнені полімери.

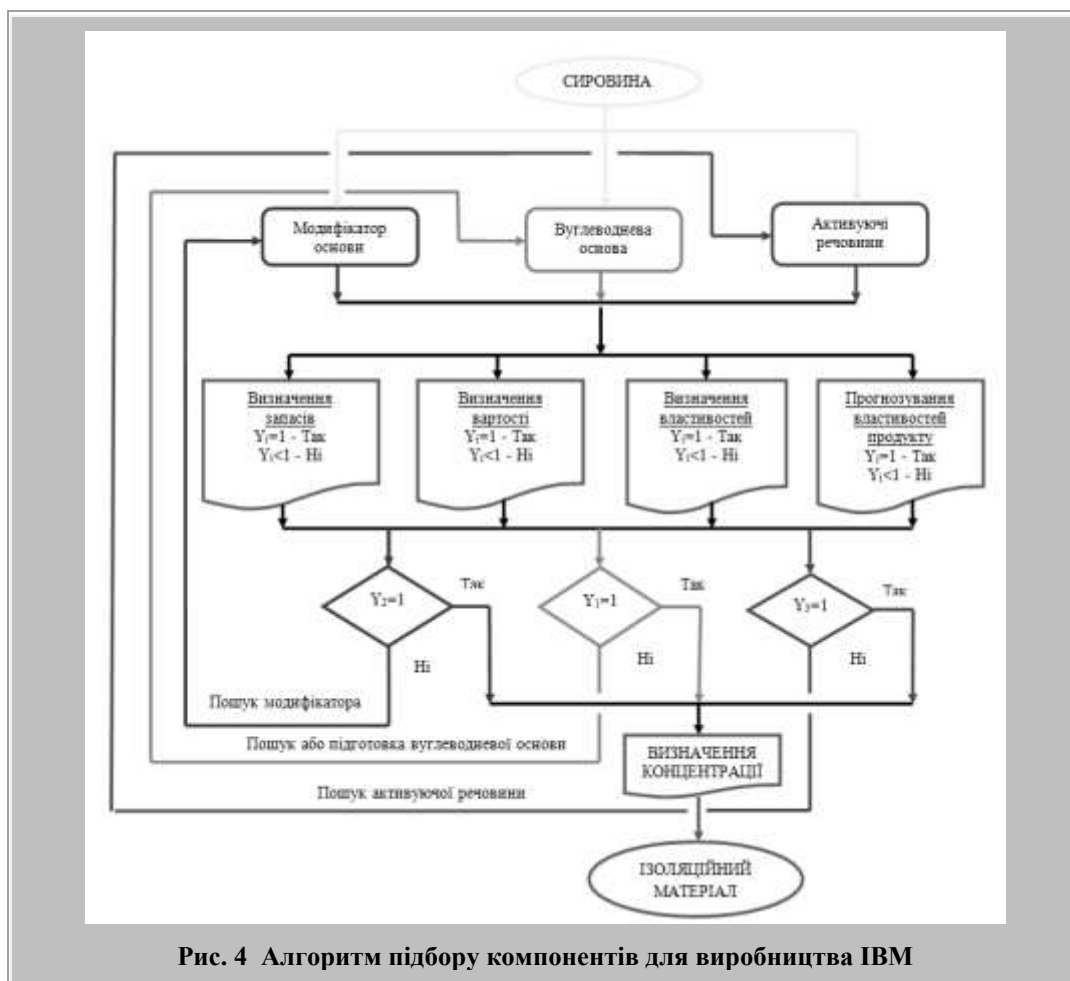


Рис. 4 Алгоритм підбору компонентів для виробництва ІВМ

Таким чином, враховуючи все наведене вище, пропонуємо універсальну формулу ІВМ для захисту газота нафтопроводів

$$\text{ІВМ} = \text{ВО} + \text{М} + \text{АР}, \quad (1)$$

де ВО – вуглеводнева основа; М – модифікатор вуглеводневої основи; АР – активуюча речовина. Формула (1) за необхідності може бути доповнена такими компонентами, як мінеральні наповнювачі, барвники, тощо.

У відповідності до формули (1) запропонуємо алгоритм підбору компонентів для виробництва ізоляційних матеріалів, який у загальному вигляді представлено на рис. 4.

Запропонований алгоритм базується на визначенні наявних запасів компонентів, здатних забезпечити промислове виробництво ізоляційного матеріалу; визначенні вартості та властивостей цих компонентів; прогнозуванні властивостей ІВМ, що їх забезпечать обрані компоненти. Зазначені характеристики можуть бути розширені за рахунок додаткового визначенні сумісності обраних компонентів, показників екологічної безпеки тощо.

Висновки

1. Проведений аналіз джерел інформації дозволив систематизувати данні щодо використання різних видів ізоляційних матеріалів, визначити галузі їх застосування, переваги та основні недоліки, які виявляються при їх застосуванні для захисту газота нафтопроводів. На підставі цього було визначено перспективний напрямок виробництва нових ІВМ, основними компонентами яких виступатиме вторинна сировина – різні види відходів споживання та виробництва.

2. Розглянуто потенціал запасів в Україні вторинної сировини, яка може бути використана при виробництві ізоляційних матеріалів, визначено здатність сировини формувати основні експлуатаційні властивості кінцевого продукту – ІВМ.

3. На підставі проведених теоретичних досліджень запропоновано універсальну формулу ІВМ та алгоритм підбору основної сировини, що дозволяє реалізувати системний підхід до розробки нових високоефективних видів ІВМ для захисту газота нафтопроводів від корозії.

Бібліографічний список

1. ДСТУ 4219-2003 Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. – К.: ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2003. – 75 с.
2. Никулишин І.Є. Дослідження біостійкості захисних ізоляційних покриттів, модифікованих нафтопродуктами смолами / І.Є. Никулишин, З.Г. Піх, С.О.

Гнатуш, З.Я. Гнатів, Р.Т. Чайківська // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2016. – № 2/6 (80). – С. 31-39.

3. Diana Movilla Quesada. Experimental study of bituminous mastic behaviour using different fillers based on the UCL method / Diana Movilla Quesada, Angel Vega-Zamanillo, Miguel Ángel Calzada-Pérez, Daniel Castro-Fresno // Journal of Civil Engineering and Management. – 2013. – № 19(2). – P. 149-157. <https://doi.org/10.3846/13923730.2012.734848>.

4. Krzysztof Błażejowski. Bitumen Handbook / Krzysztof Błażejowski, Marta Wójcik-Wiśniewska, Wiktoria Baranowska, Przemysław Ostrowski. – Płock: ORLEN Asphalt sp. z o.o., 2021. – 148 p.

5. Бауман К.В. Квітаційна технологія виготовлення бітумних емульсій : монографія / К.В. Бауман, І.В. Коц. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 128 с.

6. Дворкін Л.Й. Будівельне матеріалознавство / Л.Й. Дворкін, С.Д. Лаповська. – К.: Кондор-Видавництво, 2017. – 472 с.

7. Zaikin A.E. Tape polymer materials for anti-corrosion insulation of pipelines / A.E. Zaikin, S.Y. Sofina, O.V. Stoyanov // Polymer Science Series D. – 2011. – № 4(3). – P. 209-220. <https://doi.org/10.1134/S1995421211030208>.

8. Thompson I. Review of pipeline coating systems from an operator's perspective / I. Thompson, J. Saithala // Corrosion Engineering Science and Technology. – 2015. – 51(2). – P. 1743278215Y.000. <https://doi.org/10.1179/1743278215Y.0000000038>.

9. Hossein Zargarnezhad. A Critical Review of the Time-Dependent Performance of Polymeric Pipeline Coatings: Focus on Hydration of Epoxy-Based Coatings / Hossein Zargarnezhad, Edouard Asselin, Dennis Wong, C. N. Catherine Lam // Polymers. – 2021. – № 13(9). – P. 1517. <https://doi.org/10.3390/polym13091517>.

10. Shan Qian. Degradation of fusion bonded epoxy pipeline coatings in the presence of direct current interference / Shan Qian, Y. Frank Cheng. // Progress in Organic Coatings. – 2018. – 120. – P. 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.03.012>.

11. Amir Samimi. Application Polyurethane as Coating in Oil and Gas Pipelines / Amir Samimi, Soroush Zarinabadi // Science and Engineering Investigations. – 2012. – Vol. 1. – Iss. 8. – P. 43-45.

12. Serednyts'kyi Ya.A. Polyurethane materials as anticorrosive coatings of pipelines / Ya. A. Serednyts'kyi // Science For Production. – 2000. – № 36. – P. 415-421. <https://doi.org/10.1007/BF02769604>.

13. Guojing Chen. Self-sealing polyurethane coatings containing high oil-absorption resin for storage facility and fuel pipelines / Guojing Chen, Wenyu Fu, Zhiqiang Liu, Hao Wei, Zhijia Zhang, Guojun Zhang, Songsong Zhang, Qiang Wang, Rui Li, Xiao Ouyang // Progress in Organic

Coatings. – 2022. – 166: 106789. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106789>.

14. Термостійкі мастильні матеріали Molykote для вузлів енергетичної арматури. Офіційний сайт компанії «EMBER OIL» / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://emberoil.com/rass/emberoil387.html>.

15. Cheshko F. The possibility of reducing the carcinogenicity of coal tar electrode pitches / F.F. Cheshko, A.L. Borisenko, A.Yu. Martynova, V.M. Shmalko, O.I. Zelenskii // *Petroleum and Coal*. – 2019. – Vol. 61. – Iss. 6. – P. 1337–1342.

16. Карчакова В.В. Науково-технологічні засади оптимізації спікання кам'яновугільних пеків з електродними наповнювачами / Дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук (доктора філософії). Спеціальність 05.17.07. Державне підприємство «Державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)». – Харків, 2019. – 159 с.

17. Petrolatum Mastic For Pipe The Flange Valve Manhole Bend. Jining Xunda Pipe Coating Materials Co. Ltd. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.xundapipcoating.com/petrolatum-pipe-coating/petrolatum-mastic/petrolatum-mastic-for-pipe-the-flange-valve.html>.

18. Гідроізоляція. Рідка гума – IMPERMEABILIZANTE E-88 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://licon.com.ua/satecma.impermeabilizante_e-88.html.

19. Іванов С.В. Контроль якості лакофарбових матеріалів / С.В. Іванов, С.В. Тітова, В.В. Трачевський, В. Грушак. – К.: НАУ, 2017. – 452 с.

20. Емаль АКВАХІМ ЕПМ / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.akvahim.com.ua/emal-akvahim-epm/>

21. Caputo P. Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances by Michele Porto / P. Caputo, V. Loise, Sh. Eskandarsefat, B. Teltayev, C.O. Rossi // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 742. <https://doi.org/10.3390/app9040742>.

22. Jiqing Zhu. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges / Jiqing Zhu, Björn Birgisson, Niki Kringos // *European Polymer Journal*. – 2014. – № 54. – P. 18-38. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>.

23. Shivokhin M. Construction and Building Materials Rheological behaviour of polymer-modified bituminous mastics: A comparative analysis between physical and chemical modification / M. Shivokhin, M. García-Morales, P. Partal, A.A. Cuadri, C. Gallegos // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 27. – Iss. 1. – P. 234-240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.055>.

24. Soni K.M. Waste to Resource for Sustainable Development / K.M. Soni // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 5. – P. 1-6. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i5/87247>.

25. Sabergaliyev M.M. Engineering and Technology Modified bitumen-polymer mastic to protect metal coatings from corrosion / M.M. Sabergaliyev, G.Z. Yelighbayeva, D.A. Khassanov, S.R. Muradova, Z.K. Orazalin, D.T. Ainakulova, R.Kh. Sharipov, Negim El-Sayed // *Complex Use of Mineral Resources*. – 2024. – Vol. 331. – Iss. 4. – P. 12-20.

26. Cong P. Chemical, and physical properties of hot mixing epoxy asphalt binders / P. Cong, W. Luo, P. Xu, Y. Zhang // *Construction and Building Materials*. – 2019. – № 198. – P. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.275>.

27. Хлібишин Ю.Я. Дослідження модифікації дорожніх бітумів гумовою крихтою / Ю.Я. Хлібишин, І.Я. Почапська, О.Б. Гринишин, А.О. Назурський // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. – 2014. – № 787. – С. 144-148.

28. Sienkiewicz M. Eco-friendly modification of bitumen: The effects of rubber wastes and castor oil on the microstructure, processability and properties / M. Sienkiewicz, P. Gnatowski, M. Malus, A. Grzegórska, H. Ipakchi, M. Jouyandeh, Ju. Kucińska-Lipka, F. J. Navarro, M. R. Saeb // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – 447: 141524. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141524>.

29. Мастика гумово-бітумна РБВ-25, РБВ-35, РБВ-50 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3605727.com.ua/mastyka-gumovo-bitumna-rbv-25>.

30. Мастика бітумно-каучукова гаряча, мастика МБК-Г / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://antikorkm.com.ua/p1878056490-mastika-bitumno-kauchukovaya.html>.

31. Тамбовцева Т. Циркуляційна економіка: тенденції та перспективи розвитку / Т. Тамбовцева, Л. Мельник, І. Дегтярьова, С. Ніколаєв // *Механізм регулювання економіки*. – 2021. – № 2 (92). – P. 33-42. <https://doi.org/10.21272/mer.2021.92.04>.

32. Аблєєва І.Ю. Дослідження складу та структури бурового шлама з метою обґрунтування вибору методу його подальшої утилізації / І.Ю. Аблєєва, Л.Д. Пляцук, О.П. Будьоний // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*, 2014. – С. 85-96

33. Фридер І.В. Використання кислих гудронів у виробництві нафтових бітумів / І.В. Фридер, П.І. Тонільницький, О.Б. Гринишин // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. – 2013. – № 761. – С. 452-457.

34. Братичак М.М. Технологія нафти та газу / М.М. Братичак, О.Б. Гринишин. – Львів: Львівська політехніка, 2002. – 180 с.

35. Корнієнко Б.В. Сучасний ринок виробництва та переробки полімерних відходів [Електронний ресурс] / Б. В. Корнієнко, О. А. Гордієнко, М. В. Хутько [та ін.] // *Матеріали LI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 31 травня 2022 р.* / [Електронний

ресурс]. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/15193>.

36. **Baivab Singh.** Mastic of polymer-modified bitumen and poly(vinyl chloride) wastes / **Baivab Singh, M. Gupta Hina, Nil Tarannum** // *Journal of Applied Polymer Science.* – 2003. – Vol. 90. – 5. – P. 1347-1356. <https://doi.org/10.1002/app.12795>.

37. **Yerzhan Imanbayev.** Modification of Bitumen with Recycled PET Plastics from Waste Materials / **Yerzhan Imanbayev, Akkenzhe Bussurmanova, Yerdos Ongarbayev, Akmaral Serikbayeva, Serik Sydykov, Maxat**

Tabylganov, Anar Akkenzheyeva, Nurlan Izteleu, Zhansaya Mussabekova, Dauren Amangeldin, Yerbol Tileuberdi // *Polymers.* – 2022. – Vol. 14. – Iss. 21. – P. 4719. <https://doi.org/10.3390/polym14214719>.

38. *Tire Recycling UA* / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tirerecycling.com.ua/?lang=uk>

39. **Гринишин О.Б.** Модифікування дорожніх бітумів зумовленою крихтою відпрацьованих шин / **Гринишин О.Б., Назурський А.О., Почапська І.Я., Хлібишин Ю.Я.** // *Екологічні науки.* – 2015. – № 18-19. – С. 64-70.

Рукопис надійшов до редакції 20.08.2024

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-5-48-60

Specialty 161. U.D.C. 628.483

NEW INSULATING HYDROCARBON MATERIALS FOR PROTECTION OIL AND GAS PIPELINES FROM CORROSION

© **A.Y. Gaipov, A.B. Grigorov**, Doctor of Technical Sciences (National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine)

The article provides an overview of sources devoted to the issue of passive corrosion protection of gas and oil pipelines by applying coatings represented by insulating hydrocarbon materials (IHM) to their surface. Basic requirements for their properties are formulated, compliance with which guarantees effective protection of the metal surface of the pipes, which contributes to ensuring their reliability during operation. The effectiveness of application and the main shortcomings of each of the IHMs, which are currently quite widely used in the industry of Ukraine, are analyzed. Based on this, the main direction of scientific research related to the creation of new composites, which will be characterized by a high level of operational properties, low cost, and their actual production, will contribute to the improvement of the ecological situation in the country, has been chosen. Such results can be achieved by using secondary raw materials – production and consumption waste – as raw materials for the technological process of the production of IHM. A universal formula of insulating hydrocarbon materials is proposed, which includes a hydrocarbon base, a modifier of this base, and an activating substance. In view of this, the following were chosen as the most promising components of IHM from among the secondary raw materials: for the hydrocarbon base – spent petroleum products, oil sludge, acid tars, tar-asphaltic substances, substandard products of oil refining and coke chemical production; for modifiers – polymers, cellulose, rubber, hydrocarbon solvents; for activating substances – salts of higher primary, secondary and tertiary aliphatic amines, amidoamines, tetrasubstituted ammonium bases, higher carboxylic acids, salts (soaps) of heavy and alkaline earth metals of higher carboxylic acids. According to the IHM formula, an algorithm for determining and selecting raw materials is presented, which allows implementing a systematic approach to the development of new highly effective types of materials for the protection of gas and oil pipelines.

Keywords: pipelines, corrosion, insulating hydrocarbon materials, protective coatings, secondary raw materials, petroleum products, coal pitch, polymers, rubber crumb, tar-asphaltic substances.

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



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 № 6 від 25.10.2024 р.

Відповідальний за випуск Чешко Ф.Ф.

Набір тексту та макет Званчук-Малік В.Г.

Ціна договірна

Підписано до друку 16.12.2024 р. Формат 60×84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Друк офсетний.

Облік.-видавн. арк. 7,36. Умовн. друк. арк. 6,97. Наклад 150 прим. Зам. № 24-82.

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