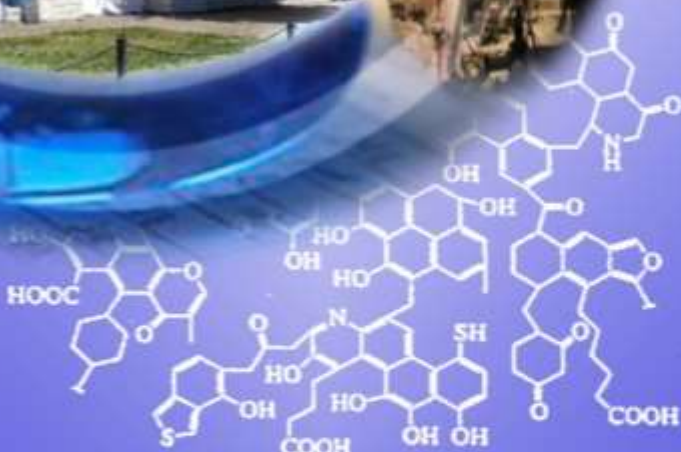




ISSN 1681-309X

ВуглеХімічний журнал



6

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. Мірошніченко (м. Харків), проф., д.т.н. А. Мянєвські (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. Гуляєв, с.н.с., к.т.н. І.Д. Дроздник, проф., д.т.н. О.М. Касімов, проф., д.т.н. Є.Т. Ковальов, доц., к.т.н. Ю.В. Луценко, к.т.н. А.Ю. Мартинова, к.т.н. М.О. Соловійов, с.н.с., д.т.н. Ф.Ф. Чешко

ВуглеХімічний
журнал

6

Науково-виробничий
журналВиходить шість номерів
на рікЗаснований у вересні
1993 р

ЗАСНОВНИКИ:

Українська науково-
промислова
асоціація
«УКРКОКС»ДЕРЖАВНЕ
ПІДПРИЄМСТВО
«УКРАЇНСЬКИЙ
ДЕРЖАВНИЙ
НАУКОВО-
ДОСЛІДНИЙ
ВУГЛЕХІМІЧНИЙ
ІНСТИТУТ
(УХІН)»Державне
підприємство
«Державний інститут
по проектуванню
підприємств
коксохімічної
промисловості»
(ДП «ГИПРОКОКС»)При передруці матеріалів
посилання на журнал
обов'язкове.За зміст рекламних матері-
алів редакція
журналу відповідальності
не несе.

Ціна договірна.

Зміст

стор.

- Кравченко С.О., Фоміна В.М., Чаплянко С.В., Когтін А.А., Радченко В.В., Томілін Ю.О.* Підсушка вугільної шихти з застосуванням відпрацьованого пару УСГК 3
- Григоров А.Б., Зеленський О.І.* Використання органічних добавок в процесі коксування вугільної шихти 7
- Мірошніченко Д.В., Шмельцер К.О., Кремер М.В., Ситник О.В., Авдеюк І.М.* Аспекти впливу на величину тиску розпирання вугільної шихти та металургійні властивості коксу 2. Прогнозування тиску розпирання вугільних сумішей та його вплив на фізико-механічні властивості коксу 13
- Абдулін С.Ю., Стельмаченко С.Ю., Коськова Г.Е.* Доцільність застосування ступінчастого підведення повітря у коксових печах різної висоти 27
- Кравченко С.О., Цимбал А.О., Чаплянко С.В., Сухорукова С.В.* Визначення ефективності технології сухого гасіння коксу 36
- Гайнов А.Я., Григоров А.Б.* Технологічні основи виробництва ізоляційних вуглеводневих матеріалів для захисту від корозії нафто- та газопроводів 41

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-6-1-48

Journal of Coal Chemistry

6

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.

- Kravchenko S.A., Fomina V.M., Chaplianko S.V., Kogtin A.A., Radchenko V.V., Tomilin Y.O.** Drying of coal blend using waste steam of Dry Coke Cooling Lantp 3
- Grigorov A.B., Zelenskyi O.I.** Using of organic additives in the coking process of coal blends 7
- 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 2. Prediction of bursting pressure of coal blends and its influence on the physical and mechanical properties of coke 13
- Abdullin S.Yu., Stelmachenko S.Yu., Koskova H.E.** Feasibility of application of step-by-step air supply in coke ovens of different heights 27
- Kravchenko S.A., Tsymbal A.O., Chaplianko S.V., Sukhorukova C.V.** Definition of dry coke cooling technology efficiency 36
- Gaipov A.Y., Grigorov A.B.** Technological basis of production of insulating hydrocarbon materials for corrosion protection of oil- and gaspipelines 41

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-6-1-48

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

ПІДСУШКА ВУГІЛЬНОЇ ШИХТИ З ЗАСТОСУВАННЯМ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ПАРУ УСГК© С.О. Кравченко¹, В.М. Фоміна², С.В. Чаплянко³, А.А. Когтін⁴, В.В. Радченко⁵, Ю.О. Томілін⁶

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, нач. групи вугільного відділу (ВВ), e-mail: uo.gpk.ua@gmail.com³ Чаплянко Світлана Володимирівна, канд. техн. наук, с.н.с., учений секретар, e-mail: chaplianko_sv@ukr.net⁴ Когтін Артем Анатолійович, головний інженер проекту, e-mail: kogtin.giprokoks@gmail.com⁵ Радченко Володимир Васильович, провідний інженер ВВ, e-mail: uo.gpk.ua@gmail.com⁶ Томілін Юрій Олексійович, провідний інженер ВВ, e-mail: uo.gpk.ua@gmail.com

Із метою збільшення енергоефективності процесів коксохімічного виробництва розроблено технологічну схему підсушки вугільної шихти до 5,5 % (у середньому) вологості із використанням паротрубно-барабанної сушарки (конструкцією за схемою STD) при застосуванні тепла відпрацьованої водяної пари після турбогенераторів установок сухого гасіння коксу 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. Кожна технологічна лінія складається із наступних основних агрегатів: бункер вологої вугільної шихти; дозатор безперервної дії; сушарка паротрубно-барабанна; теплообмінник кожухотрубний; шлюзові живильники (4 шт.); вузол відбору конденсату; вентилятор; димосос; циклофільтр трьох ступенів очищення; трубопровідна арматура; клапани дросельні (2 шт.). Для трьох технологічних ліній (модулів) є спільними: конвеєр стрічковий, конвеєр стрічковий із плоскою стрічкою, клапан на два положення із приводом ПВМ, скидач плужковий двосторонній та конвеєр стрічковий для підсушеної шихти.

Технологічною схемою передбачено впровадження автоматизованої системи управління технологічними процесами, використання контрольно-вимірювальних приладів і мікропроцесорної техніки. Для електропостачання електроприймачів сушильного відділення передбачено трансформаторну підстанцію.

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

Ключові слова: коксування, вугільна шихта, підсушка, енергоефективність, паротрубно-барабанна сушарка, відпрацьована водяна пара, установка сухого гасіння коксу.

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

Враховуючи, що до 24.02.2022 енергоемність валового внутрішнього продукту в Україні була більш, ніж вдвічі вища за енергоемність промислово розвинутих країн Західної Європи, а після – зафіксовано її зростання, наразі питанню енергоефективності приділяється особлива увага на державному і галузевому рівнях. ДП «ГИПРОКОКС», як провідна у проектуванні коксохімічних виробництв наукова установа, розробляє, удосконалює та впроваджує новітні технології і сучасне обладнання, що забезпечують підвищення ефективності процесів у галузі [1-3].

Збільшення енергоефективності процесу підсушки вугільної шихти можливо декількома способами, у тому числі за рахунок використання тепла [4, 5]:

- продуктів горіння коксового газу з додаванням димових газів із борова димової труби коксової батареї;
- відпрацьованої водяної пари після турбогенераторів установок сухого гасіння коксу (надалі УСГК).

У даній роботі наведено результати досліджень зниження вологості вугільної шихти з 10,5 до 5,5 % (у середньому) при застосуванні тепла відпрацьованої водяної пари після турбогенераторів УСГК. Робота є складовою дослідження методів і технологій зниження вологості вугільної шихти та виконана порівняно з процесом підсушки вугільної шихти з використанням тепла продуктів горіння коксового газу з додаванням димових газів із борова димової труби коксової батареї. Пропоновані технології дозволяють при зниженні енергетичних витрат підвищити якість коксу та продуктивність коксових батарей (надалі КБ), а також враховують екологічну складову (забезпечують зменшення кількості стічних вод і парогазових продуктів коксування).



Рис. 1 Паротрубна барабанна сушарка одного з розглянутих виробників обладнання [6]

При виборі типу сушарки перевагу надано паротрубній барабанній (насамперед, через простоту конфігурації, швидкий монтаж та пуск, відносно дешеве обслуговування основних вузлів, можливість утилізації тепла наявних енергоресурсів). При виборі типу конструкції сушарки перевагу надано схемі STD (насамперед, через відсутність підвищених вимог до сипучих властивостей матеріалу): шихта рухається в міжтрубному просторі

барабана, а пара подається в труби, розташовані усередині порожнини корпусу барабана (див. рис. 1).

Обертання корпусу сушарки при його нахилі до горизонталі забезпечує безперервне переміщення шихти в осьовому напрямку в бік вивантажувальної частини корпусу. При обертанні барабану порція матеріалу внаслідок багаторазового пересипання рівномірно підсушується, отримуючи тепло через стінки труб з парою. Система подачі пари – зворотна. Пара тиском 0,6 МПа та температурою 250 °С подається в порожній вал барабану сушарки і далі в труби. Відпрацьована водяна пара тиском 0,11 МПа та температурою 120 °С через колектори подається в теплообмінник для підігріву сушильного агента (зовнішнього повітря), а потім через конденсатор-відвідник відводиться в міжщелеві комунікації. Вилучена волога (випар) відводиться із сушарки сушильним агентом (підігрітим повітрям), який відсмоктується вентилятором через очисні фільтри.

Метою роботи є розробка технологічної схеми підсушки вугільної шихти до 5,5 % вологості із використанням барабанних сушарок при застосуванні тепла відпрацьованої водяної пари після турбогенераторів УСГК.

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;
- теплоносій – пара, сушильний агент – підігріте повітря.

За основу взято широко поширений процес підсушування шихти за способом *Coal Moisture Control*. Із врахуванням потреби КБ 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 (табл. 1, 2) [7].

Таблиця 1

Матеріальний баланс процесу сушіння

Найменування показника	Одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність по абсолютно сухій шихті	кг/год	95800
Кількість вилученої вологи (вміст вологи, що випарилася)	кг/год	5663,5
Кількість залишкової вологи (вміст вологи, що залишилася після сушки)	кг/год	5575,5

Таблиця 2

Тепловий баланс процесу сушіння

Найменування показника	Одиниця вимірювання	Значення
Теплота на випаровування вологи з матеріалу	кДж/год	13026050
Теплота на нагрівання сухого матеріалу	кДж/год	5930467
Теплота на нагрівання вологого матеріалу	кДж/год	714725

Як видно з даних табл. 2, теплота на нагрівання вологого матеріалу становить ~ 4 %, теплота на нагрівання сухого матеріалу ~ 30 %, теплота на випаровування вологи з матеріалу ~ 66 % від сумарних витрат тепла на сушіння.

Розрахунками також визначено:

– витрата пари для отримання потрібного тепла (19671242 кДж/год) становить 6557,1 кг/год (для визначення параметрів сушильного барабану);

– обсяг відпрацьованого сушильного агента за годину – «випара» (підігріте повітря та випарена волога) становить 20643 м³/год, а з урахуванням підсмоктування повітря в обсязі 70 % – 36000 м³/год (для визначення димососу і апарата системи пиловловлювання);

– кількість тепла, що віддається відпрацьованою парою теплообміннику для нагрівання зовнішнього повітря, становить 260343,4 Кк/год; температура повітря, що подається в сушарку після теплообмінника дорівнює 84 °С (для визначення теплообмінника).

Визначено основні конструктивні розміри (оптимальне відношення довжини до діаметру дорівнює 7,7) і встановлено марку та характеристики сушарки: маса – 130 т, споживана потужність приводу – 132 кВт, частота обертання барабану – 3,43 об/хв. Визначено основні допоміжні пристрої технологічного процесу сушіння. Розроблено технологічну схему підсушування шихти. Кожна технологічна лінія (модуль) складається із наступних основних агрегатів:

- бункер вологої вугільної шихти;
- дозатор безперервної дії (стрічковий);
- сушарка паротрубна барабанна;
- теплообмінник кожухотрубний для підігріву зовнішнього повітря;
- шлюзові живильники (4 шт.);
- вузол відбору конденсату;
- вентилятор для наддуву повітря сушильного агента з напрямним апаратом, дообладнаний приводом МЕО;
- димосос для відпрацьованого сушильного агента з напрямним апаратом, дообладнаний приводом МЕО;
- циклофільтр трьох ступенів очищення вибухозахищений з імпульсною регенерацією;
- трубопровідна арматура;
- клапани дросельні, дообладнані приводом МЕО (2 шт.).

Для трьох технологічних ліній (модулів) є спільними: конвеєр стрічковий (довжина конвеєра визначаєть-

ся в кожному конкретному випадку залежно від розміщення сушильного відділення), конвеєр стрічковий із плоскою стрічкою, клапан на два положення із приводом ПВМ, скидач плужковий двосторонній, збірний конвеєр стрічковий.

У цілому, параметри процесу сушіння однієї технологічної лінії (модуля) наступні:

- витрата вологого матеріалу, що підлягає сушінню – 107,039 т/год;
- продуктивність по підсушеній шихті вологістю 5,5 % – 101,376 т/год;
- початкова температура матеріалу що підлягає сушінню – 20 °С, кінцева – 70 °С;
- об'єм: сушильного агента на вході в барабан – 13620 м³/год, відпрацьованого агента на виході з барабану – 36000 м³/год;
- температура: сушильного агента на вході в барабан – 84 °С, відпрацьованого агента на виході з барабану – 105 °С.

Окремо слід зазначити, що при визначенні апарату для очищення відпрацьованого сушильного агента перевагу надано сучасним очисним пристроям, що поєднують у собі: відцентровий канал (1 ступінь очищення), відцентрову камеру циклону (2 ступінь очищення) і фільтрувальні рукави фільтра тканинного (3 ступінь очищення). Викиди забруднюючих речовин у повітря не перевищують 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, безпечно експлуатацію технологічного обладнання.

Також технологічної схемою передбачено впровадження автоматизованої системи управління технологічними процесами, яка охоплює:

- 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.

Для управління механізмами потоково-транспортної системи з підсушуванням шихти перед коксуванням передбачено використання мікропроцесорної техніки.

Апаратуру управління електроприводами передбачено розмістити на щитах управління електродвигунами змінного струму, які встановлюються на об'єктах у спеціальних електроприміщеннях. Для електропостачання електроприймачів сушильного відділення передбачено трансформаторну підстанцію.

Щодо економічної складової: доведено ефективність впровадження підсушки вугільної шихти з використанням паротрубною барабанної сушарки при застосуванні тепла відпрацьованої водяної пари котельної УСГК. Економічні показники використання пари як вторинного ресурсу дають підстави не сумніватися у вигідності застосування саме цього виду теплоносія. Термін окупності, розрахований із річного економічного ефекту, менший за 2,9 роки.

Порівняно з процесом підсушки вугільної шихти з використанням тепла продуктів горіння коксового газу з додаванням димових газів із борова димової труби коксової батареї вартість капітальних витрат на будівництво сушильного відділення з паротрубними барабанними сушарками менша, оскільки:

- замість прямого коксового газу в якості теплоносія використовується дешева відпрацьована водяна пара котельної УСГК;

- не застосовуються: теплогенератори безфутерувальні, топковий та розпалювальний пристрої, складний набір запірної арматури та запобіжних пристроїв на підведенні коксового газу до топки, тощо;

- знижується сумарний об'єм відпрацьованого сушильного агенту, що відсмоктується на очищення (за відсутності об'єму топкових газів і присутності тільки «випара»), та, відповідно, спрощується схема очищення паропилоповітряних сумішей і зменшується типорозмір вентилятора-димососа;

- простіше та дешевше обслуговування основних вузлів сушильного відділення;

- не застосовується складна схема контрольно-вимірювальних приладів та автоматизації контролю роботи топки, вентилятора подачі повітря на горіння, димососу димових газів та трубопроводів повітря та димових газів.

У подальшому отримані результати роботи враховуватимуться при виборі оптимальних технологій підсушки вугільної шихти та використовуватимуться у проєктах ДП «ГИПРОКОКС» із врахуванням умов конкретних промислових об'єктів.

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 су-бекономайзера 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 сату-ратора з нержавіючої сталі // **С.О. Кравченко, С.В. Чаплянко, С.В. Сухорукова, А.В. Рогожин, А.А. Ког-тін** // Вуглехімічний журнал. – 2023. – № 5. – С. 33-37. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-5-33-37>.

4. **Кравченко С.О.** Підсушка вугільної шихти зі за-стосуванням димових газів або відпрацьованого пару / **С.О. Кравченко, В.М. Фоміна, С.В. Чаплянко** // Сучасні технології переробки паливних копалин: тези допові-дей VII Міжнародної науково-технічної конференції, 17-18 квітня 2024 р. / Нац. техн. ун-т "Харків. полі-техн. ін-т", Укр. держ. н.-д. вуглехім. ін-т (УХІН). – Харків: НТУ "ХПІ", 2024. – С. 50-52. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/78636>.

5. **Кравченко С.О.** Підсушка вугільної шихти з за-стосуванням димових газів / **С.О. Кравченко, В.М. Фоміна, С.В. Чаплянко** // Recent Trends in Science: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practi- cal Internet Conference (Dnipro, May 16-17, 2024) / FOP Marenichenko V.V., Dnipro, Ukraine, P. 118-120 / [Елек- тронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2024/05/Conference-Proceedings-May-16-17-2024-1.pdf>.

6. **Tsukishima Kikai Co., Ltd** / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tsk-g.co.jp/en/tech/industry/std/>

7. **Кравченко С.О.** Розробка технологічної схеми підсушки вугільної шихти з застосуванням димових газів / **С.О. Кравченко, В.М. Фоміна, С.В. Чаплянко** // Вуглехімічний журнал. – 2024. – № 5. – С. 3-8. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2024-0-5-29-33>.

Рукопис надійшов до редакції 19.08.2024

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-6-3-7

Specialty 161. U.D.C. 622.79

DRYING OF COAL BLEND USING WASTE STEAM OF DRY COKE COOLING LANTP

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

In order to increase the energy efficiency of blast coke and by-product manufacturing processes, a technological scheme was developed for coal blend drying to 5,5 % (on average) moisture content using a steam tube drum dryer (by STD scheme design) using the heat of the spent steam after the turbogenerators of the coke dry cooling plants on 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. Each process line has the following main units: wet coal blend bin; dosing devices of continuous action, shell-and-tube heat exchangers; sluice feeders (4 nos.); unit of condensate tapping; fan; smoke fan; cyclofilters of three purification stages; pipeline fittings, throttle valves (2 nos.). The common units for three process lines are: belt conveyor, belt conveyor with flat belt, two-position valve with screw drive, double-sided drag plough and belt conveyor for dried coal blend.

The process diagram provides for implementation of automated control system of technological processes, use of instrumentation and microprocessor equipment. Transformer substation is envisaged for power supply of electric consumers of drying department.

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 under 2,9 years.

Keywords: coking, coal blend, drying, energy efficiency, steam tube drum dryer, waste steam, dry coke quenching installation.

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

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-6-7-13

Спеціальність 161. УДК 662.7:552.57

ВИКОРИСТАННЯ ОРГАНІЧНИХ ДОБАВОК В ПРОЦЕСІ КОКСУВАННЯ ВУГІЛЬНОЇ ШИХТИ

© А.Б. Григоров¹

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

О.І. Зеленський²

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)», вул. Весніна, 7, м. Харків, 61000, Україна

¹ Григоров Андрій Борисович, докт. техн. наук, проф., проф. кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, e-mail: grigorovandrey@ukr.net

² Зеленський Олег Іванович, канд. техн. наук, ст. досл., заст. зав. коксовим відділом, e-mail: zelenskii.ukhin@gmail.com

У статті наведено огляд щодо можливості застосування рідких органічних матеріалів в якості обмаслюючих та спікаючих добавок у вугільні шихти. Запропоновано класифікацію цих добавок за типом вихідної сировини, що охоплює: підготовані суміші вуглеводнів; товарні продукти нафтопереробного та коксохімічного виробництва; технологічно отримані добавки, отримані спрямовано виключно для підвищення спікливості кам'яновугільної шихти; різноманітні види відходів, що накопичуються у кількості, котра дозволяє використовувати їх як порівняно дешеві спікливі добавки з одночасною термічною утилізацією небезпечних речовин. Сформульовано основні вимоги для промислового застосування рідких органічних добавок, до яких відносяться: низька вартість; запаси, здатні забезпечувати промислове застосування; в'язкість і структура, що забезпечує зручність транспортування і змішування з вугільними шихтами; збільшення насипної щільності вугільної шихти під час її завантаження; інертність до матеріалу, з якого виготовлені змішувальні пристрої та транспортуючі

пристрої; здатність до рівномірного розподілу за об'ємом шихти; певний фракційний і груповий хімічний склад, що дозволяє брати участь в утворенні пластичного шару; відсутність негативного впливу на якість хімічних продуктів коксування; відсутність негативного впливу на кладку печей; не належність до I чи II класів небезпечних речовин.

Встановлено, що введення добавок у певних концентраціях дозволяє поліпшити показник міцності коксу і істотно збільшити вихід цінних хімічних продуктів коксування (зокрема бензолу). Показано, що органічні рідкі добавки з великою густиною можуть використовуватися в якості середовища для внесення у вугільну шихту тонкодисперсних неорганічних порошків (наприклад, B_4C , SiC , тощо), які виступають об'ємно-модифікуючими добавками для отримання високоякісного металургійного коксу.

Ключові слова: коксування, вугільна шихта, добавки, нафтопродукти, хімічні продукти коксування, відходи, кокс, спікливість.

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

Нестача коксівного кам'яного вугілля, яке здатне забезпечити сучасні вимоги щодо міцності металургійного коксу, зумовлює використання у вугільній шихті для коксування різних рідких органічних добавок. Історія вивчення механізму дії та практичного застосування таких добавок налічує понад 50 років і бере початок з робіт таких видатних українських вчених, як Скляр М.Г., Гютюнников Ю.Б., Бірюков Ю.В., Кафтан Ю.С., Глущенко І.М. та ін.

Рідкі добавки до кам'яновугільної шихти у виробництві металургійного коксу можна розподілити на обмаслюючі та спікаючі. Механізм дії останніх залежить від марочного складу шихти, тож доцільність їх використання має дуже вибіркового характеру.

Що стосується обмаслюючих добавок, то їхня роль передусім полягає у збільшенні насипної маси вугільного завантаження за рахунок обмаслювання зерен шихти. При цьому утворюються умови для щільнішого прилягання один до одного зерен шихти внаслідок підвищення насипної щільності, а також залучення до складу шихти вугільного пилу та слабоспікливого вугілля марок ДП та Г. В процесі коксування відбувається зсування реакцій термодеструкції у бік перебігу відновлювальних процесів, що призводить до збільшення утворення рідких нелетких продуктів деструкції. Про це свідчить зниження виходу газів (вміст водню та метану), що утворюються в інтервалі температур до 500 °С. Результатами є зменшення в'язкості пластичної маси, збільшення товщини пластичного шару, розширення меж температурного інтервалу пластичного стану вугілля. Таким чином, обмаслюючі добавки можуть застосовуватись у досить широких діапазонах марочного складу оброблюваних шихт, бо навіть якщо й не поліпшать якісні показники отриманого коксу, то, принаймні, не погіршать їх. Отже, саме цей різновид рідких добавок є найпридатнішим до ролі своєрідного носія, що може полегшити більш-менш рівномірний розподіл дрібнодисперсної твердої домішки за об'ємом вугільної шихти при її завантаженні до камери коксування. Відомо, що використання рідких органічних добавок у вугільній шихті, сприяє збільшенню її спікливості та, як наслідок, отриманню міцного коксу [1, 2].

Під час багаторічних лабораторних та промислових досліджень було встановлено, що для промислового застосування органічні рідкі добавки повинні задовольняти наступним вимогам:

- характеризуватись низькою вартістю;
- існуючі запаси добавки повинні забезпечувати її промислове застосування;
- мати певну в'язкість і структуру, що забезпечує зручність їх транспортування і змішування з вугільними шихтами;
- збільшувати насипну щільність вугільної шихти під час її завантаження;
- бути інертними до матеріалу, з якого виготовлені змішувальні пристрої та транспортуючі пристрої;
- мати здатність до рівномірного розподілу за об'ємом шихти;
- повинні мати певний фракційний і груповий хімічний склад, що дозволяє брати участь в утворенні пластичного шару;
- не чинити негативного впливу на якість хімічних продуктів коксування;
- не чинити негативного впливу на кладку печей;
- не відноситися до I чи II класів небезпечних речовин.

Класифікацію усіх рідких органічних добавок, які потенційно можна застосовувати в шихті для коксування при промисловому виробництві металургійного коксу, представимо у вигляді структурної схеми (рис. 1).



Рис. 1 Класифікація рідких органічних добавок до шихти

Детально розглянемо застосування всіх типів рідких органічних добавок до шихти, відповідно до схеми, представленої на рис. 1.

Суміші вуглеводнів. Ці добавки представлені, зокрема, зневодненою нафтою, з якої видалені вуглеводневі гази (C_2-C_4), тобто після її стабілізації [3]. Але, з огляду на цінність нафти як сировини для отримання рідкого моторного палива (товарних бензинів, керосинів, дизельного палива) та нафтового коксу [4], зазначені добавки не набули широкого промислового впровадження.

Як добавки такого типу також використовують нафтові або бітумінозні піски (пісковик, що містить бітум, важку сиру нафту з високою в'язкістю, подібну до асфальту). Нафтовий пісок у своїй фізичній структурі містить (за масою) 12 % нафти, 2-3 % пов'язаної води та 85-86 % мінералів (піску) [5]. Додавання до вугільної шихти такої добавки у кількості до 10 % призводить до підвищення міцності отриманого коксу [6].

Товарні продукти. До групи цих добавок відносяться цільові або побічні продукти нафтопереробного та коксохімічного виробництва, які у більшості випадків можуть мати значний попит в різних галузях виробництва. Завдяки цьому вони не набули широкого промислового застосування у виробництві металургійного коксу.

Відоме використання добавки, яка виступає продуктом сповільненого напівкоксування важких нафтових. Ця добавка забезпечує поліпшення коксувальних і спікальних властивостей вугільних шихт, які складаються з різномірної вихідної сировини, за рахунок розширення діапазону безперервного температурного інтервалу пластичності всієї вугільної шихти аж до 350 °C (при температурі початку пластичності 200 °C і температурі твердіння 550 °C) [7].

Проте промислове застосування такої добавки має певні складності, внаслідок того, що її надто важко розподілити рівномірно у масі вугільної шихти. Також, ця добавка має високу виробничу вартість, яка, неод-

мінно впливатиме на збільшення вартості отриманого коксу.

Відома робота [8], у котрій як спікливу добавку до вугільної шихти пропонується використовувати важкі нафтові залишки нафтопереробного заводу: вакуумний залишок з установок атмосферно-вакуумної дистиляції сирової сировини, вакуумний залишок з установки гідрокрекінгу вакуумної дистиляції і залишок з блоку вісбрекінгу. Ці продукти характеризувалися високими значеннями температури кипіння (понад 360 та 500 °C) і виходу летких речовин (у діапазоні від 15 до 25 мас. %), що дає змогу для їх використання в металургійному виробництві для часткової заміни коксівного вугілля в шихті для виробництва металургійного коксу.

В роботі [9] досліджено вплив кам'яновугільного пеку при його додаванні до вугілля, що характеризується високим (близько 38 %) виходом летких речовин і малою (11-12 мм) товщиною пластичного шару. Встановлено, що ця добавка дозволяє зменшити спучування вугілля при коксуванні та підвищити механічну міцність отриманого коксу. За класифікацією, прийнятою в Україні, такі вугілля відносяться до газової групи. При цьому позитивні ефекти є помітнішими для пеку з більш високою температурою розм'якшення. Добавки кам'яновугільного пеку у різновиди вугілля, які при нагріванні без доступу повітря виділяють значну кількість пластичної маси (товщина пластичного шару близько 20 мм), можуть не тільки негативно впливати на властивості одержуваного коксу, але й посилювати фактори, що становлять серйозний технологічний ризик. Добавки кам'яновугільного пеку до вугілля, що не спікається, можуть дати позитивний ефект тільки в кількостях, що перевищують 3 %.

Спеціальні добавки. Ці добавки, на відміну від товарних продуктів нафтопереробної та коксохімічної промисловості, отримують спрямовано для подальшого використання виключно для підвищення спікливості кам'яного вугілля, з метою отримання міцного металургійного коксу. Класифікація речовин, які входять до даного типу присадок, представлена в вигляді структурної блок-схеми на рис. 2.

Так, пропонується керувати процесом переходу вугілля в пластичний стан шляхом введення як добавки до шихти для коксування (Ж:Г–50:50) динітрил азобіс-ізомасляної кислоти (ДАК), який здатний ініціювати процеси радикальної полімеризації. Так, введення 5 % добавки ДАК збільшує товщину пластичного шару (з 13 до 15,5 мм) і тим самим збільшує здатність компонентів шихти до спікання. Дані щодо визначення показників міцності коксу вказують на можливість зниження стирання (з 21,14 до 20,62 %) при приблизно однаковій величині опору дробленню (близько 53,0 %) [10].

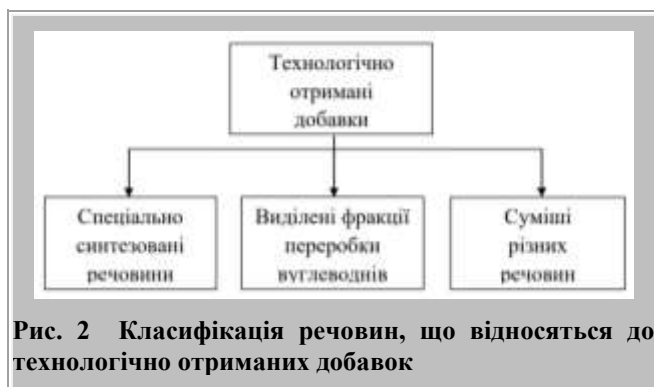


Рис. 2 Класифікація речовин, що відносяться до технологічно отриманих добавок

Відходи виробництва. Застосування відходів, що накопичуються у великій кількості, дозволяє використовувати їх як порівняно дешеві обмаслюючі та спікаючі добавки з одночасною термічною утилізацією небезпечних речовин. Класифікація відходів, що можуть бути використані в якості добавок до вугільної шихти, представлена на рис. 3.



Рис. 3 Класифікація відходів, що можуть бути використані в якості добавок до вугільної шихти

За схемою (див. рис. 3) усі відходи можна поділити на відходи виробництва та відходи споживання. Відходи виробництва утворюються під час здійснення промислової діяльності людини, відходи споживання – це побутові відходи, зокрема різні полімери (поліетилен (PEHD, PELD), поліпропілен (PP), поліетилентерефталат (PET), полістирол (PS), пінополістирол (styrofoam)). Серед промислових відходів виділяють відходи нафтопереробної, коксохімічної та хімічної промисловостей.

До відходів нафтопереробної промисловості, які можна використовувати як обмаслюючі та спікаючі добавки в шихту, відносяться: кислі гудрони, нафтовий шлам, відпрацьовані оливи та мастильно-охолоджуючі рідини [11]. Окрім цього, в якості добавки до вугільної шихти можна використовувати відпрацьовані пластичні

мастила після їх очищення від механічних домішок [12]. При цьому, з одного боку, поліпшується спікливість шихти, з іншого – утилізується багатотоннажний відход, що відноситься до III класу небезпеки. Відпрацьовані оливи можуть також використовуватися як в'язуче при виробництві побутових паливних брикетів наприклад, з коксового пилу [13].

Відпрацьовані пластичні мастила можуть виконувати і функцію середовища, в якому розподілені неорганічні спікливі добавки, що значно полегшує їх введення та рівномірне розподілення за об'ємом вугільної шихти. Однак відпрацьовані оливи та мастильно-охолоджуючі рідини користуються, порівняно з іншими відходами виробництва, високим попитом та вартістю і не можуть безпосередньо застосовуватися в шихті без попереднього очищення від кислих компонентів, що викликають корозію апаратури, та механічних домішок, що збільшують зольність коксу. Тому вони після певної попередньої підготовки широко використовуються як сировина для отримання палива (бензину та дизельного палива) [14] або безпосередньо в топкових цілях [15]. І лише відпрацьовані пластичні оливи майже не знаходять свого подальшого застосування та можуть бути використані в якості спікливих добавок до вугільної шихти.

Практичний інтерес представляє використання як спікаючих добавок відходів коксохімічного виробництва (кислих смол, фусів, тощо) не тільки з метою утилізації шкідливих речовин, а також для отримання високоякісного коксу [16-19]. Наразі раціональним напрямом утилізації кислої смолки і фусів є подача в шихту для коксування. Перспективним вважається індивідуальне коксування фусів із отриманням коксу.

На думку авторів роботи [20] актуальним є використання смолистих відходів коксохімічних підприємств як в'язучого при частковому брикетуванні шихти. Як сполучні добавки розглядаються кам'яновугільні фуси, кисла смолка, відходи з вмістом нафталіну, а також їх суміші в кількості 10–15 %. Отримувані брикети додавали до шихти в кількості 30 % і коксували при 700 °С. Увесь отриманий таким способом кокс є рівномірним за своєю структурою. Зі збільшенням кількості сполучної речовини збільшується щільність брикетів (до 1214 г/см³), а з нею збільшується насипна щільність завантаження. Використання фусів призводило до отримання дрібного коксу, але при цьому спостерігалось значне усадження (34-35,5 мм) коксового пирога. Найбільший вихід коксу (79,70 %) було отримано при використанні як сполучної суміші кислої смолки з іншими компонентами у співвідношенні 1:1, при цьому усадка коксового пирога знаходилася на рівні 14-18 мм.

Відходи хімічної промисловості є найчастіше утворюваними і менш небезпечними порівняно з відходами нафтопереробної та коксохімічної промисловості.

Відомим є спосіб хімічної переробки відпрацьованих автомобільних шин, шляхом додавання їх у кількості 2 % до вугільної шихти для коксування. Така концентрація відпрацьованих автомобільних шин є найкращим варіантом для забезпечення прийнятної якості коксу та продуктивності доменної пічки [21].

Відходи споживання можуть використовуватися в якості добавок до вугільної шихти як самостійно, так у суміші з іншими продуктами або відходами. Наприклад, існує технологія сумісного коксування вугільної шихти з високим вмістом вугілля зниженої спікливості та органічних спікливих добавок: кам'яновугільного пеку та полімерних відходів [22].

У роботі [23] досліджувалась спів-карбонізація при температурі 200–900 °С бітумінозного вугілля (марки Г і Ж, К і П) та антрациту з пластиковими відходами (PP, PET, PS) у кількості 2–10 %. Встановлено, що з використанням до 5 % PP міцність коксу збільшується з 1,5 МПа у вихідного зразка (без добавки) до 3,0–4,0 МПа у зразка з добавками полімерів. Максимальну міцність має кокс, отриманий з вугільної шихти з добавкою 3 % PS – 5,8 МПа. Однак при введенні добавок PP, PS, PET у кількості > 5 % простежується закономірне зниження міцності коксу.

У роботі [24] проведено дослідження процесу співпіролізу вугілля марки Г та відходів PET у кількості від 0,5 до 15 %. Встановлено, що при додаванні 0,5 % PET до малосірчистого вугілля показник стирання зменшується, а опір дробленню зростає. При введенні полімеру в кількості 1–5 % збільшується стирання та зменшується показник опору дробленню. При введенні пластику більше 5 % спостерігається інтенсивне газовиділення. Це веде до збільшення виходу парогазових продуктів та розвитку пористої структури, що може бути використане для отримання адсорбентів з розвиненою поверхнею.

Також відомий спосіб використання в процесі коксування вугільної шихти брикетів на основі відходів пластику (подроблені PET пляшки, вироби з полістиролу та ПХВ і поліетиленові плівки) і коксового пилу. Додавання 3–5% брикетів в шихту для коксування забезпечує отримання коксу прийнятної якості (реакційна здатність – 32-34 %; гаряча міцність CSR – 45-47 %) [25].

Висновки

Підсумовуючи наведену вище інформацію відзначимо, що на підставі багаторічного практичного досвіду застосування органічних обмаслюючих та спікаючих добавок до вугільної шихти для коксування можна відзначити наступне:

– обмаслюючі та спікаючі органічні добавки в шихті, з одного боку, дозволяють розширювати сировинну базу коксування за рахунок використання вітчизняного вугілля, що слабо спікається, з іншого – утилізувати шкідливі відходи виробництва та споживання;

– введення добавок у певних концентраціях (у більшості випадків від 1 до 5 %) дозволяють поліпшити показник міцності коксу і істотно збільшити вихід цінних хімічних продуктів коксування (зокрема бензолу).

Деякі добавки (наприклад, бітумінозні піски, відпрацьовані гумотехнічні вироби з металокордом, нафтові шлами тощо) мають високу зольність, і при їх введенні в шихту збільшується зольність отриманого з неї коксу.

Органічні рідкі добавки з великою густиною можуть використовуватися в якості середовища для внесення у вугільну шихту тонкодисперсних неорганічних порошків (наприклад, V_4C , SiC та ін.), які виступають об'ємно-модифікуючими добавками для отримання високоякісного металургійного коксу.

Також необхідно враховувати і те, що застосування деяких із запропонованих добавок пов'язане з низкою складнощів як економічного, так і технічного характеру. Так, наприклад, застосування мазуту, гудрону і рідких залишків термічного крекінгу як добавки є економічно недоцільним через їх широке використання як котельне паливо, а також отримання з них змашувальних і енергетичних олів. Проблематичним є і їх введення в шихту, яка досі, незважаючи на пропонувані змішувальні пристрої та технології, не має оптимального рішення.

Тому пошук порівняно дешевих та ефективних обмаслюючих та спікаючих добавок у шихту для коксування, що дозволяють отримувати високоякісний кокс, є пріоритетним напрямком для багатьох науково-дослідних інститутів та лабораторій не лише України, а й усього світу.

Бібліографічний список

1. *Seiji Nomura. Influence of binder (coal tar and pitch) addition on coal caking property and coke strength/ Seiji Nomura, Takashi Arima // Fuel Processing Technology. – 2017. – Vol. 159. – P. 369-375.*

2. *Борисенко О.Л. Використання вторинних продуктів хімічних цехів та олій у процесі виробництва доменного коксу / О.Л. Борисенко, Ф.Ф. Чешико, Е.І. Торняник // ВуглеХімічний журнал. – 2016. – № 6. – С. 15-21.*

3. *Білецький В.С. Основи нафтогазової справи / В.С. Білецький, В.М. Орловський, В.І. Дмитренко, А.М. Похилко. – Полтава: ПолтНТУ, Київ: ФОП Халіков Р.Х., 2017. – 312 с.*

4. *Саранчук В.І. Основи хімії і фізики горючих копалин / В.І. Саранчук, М.О. Ілляшов, В.В. Ошовський, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. – 600 с.*

5. *Yasushi Sekine. Coking Technology Using Heavy Oil Residue and Hyper Coal / Yasushi Sekine, Fumitaka Sumomozawa, Takahiro Shishido // ISIJ International. – 2014. – Vol. 54. – Iss. 11. – P. 2446-2453. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2446>.*

6. **Sekine Y.** Coking Technology Using Heavy Oil Residue and Hyper Coal / **Y. Sekine, F. Sumomozawa, T. Shishido** // *ISIJ International*. – 2014. – Vol. 54. – No. 11. – 3. 2446-2453. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2446>.
7. Пат. № 84803 UA МПК⁶ C10B 57/06, C10B 55/00. Застосування продукту сповільненого напівкоксування важких нафтових залишків як добавки до вугільних шихт / **М.І. Стуков, М.Ю. Посохов, В.С. Загайнов, Є.М. Літвін, М.В. Мамасєв, І.В. Біділо** – Заявл. 30.07.2009; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21.
8. **Kameshkov A.V.** Technology of Producing Petroleum Coking Additives to Replace Coking Coal / **A.V. Kameshkov, V.A. Rudko, R.R. Gabdulkhakov, M.Yu. Nazarenko, M.K. Starkov, V.G. Povarov, I.N. Pyagay** // *ACS Omega*. – 2021. – Vol. 6(51). – P. 35307–35314. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04075> <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04075>.
9. **Cheshko F.F.** The pyrolytic interaction of coal tar pitches with various coals / **F.F. Cheshko, V.V. Karchakova, V.V. Koval** // *Petroleum and Coal*. – 2020. – Vol. 62 (4). – P. 1601-1605.
10. **Маковський Р.В.** Перспективи використання сірчистого вугілля у процесі коксування / **Р.В. Маковський, Л.Ф. Бутузова, І.В. Ветров, В.О. Кулакова, А.В. Кипря** / Хімічні Каразинські читання – 2011: тези доповідей III Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів. – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2011. – С. 81.
11. **Борисенко О.Л.** Термічне знешкодження у коксових печах відходів коксохімічних підприємств / **О.Л. Борисенко** // *Вуглехімічний журнал*. – 2009. – № 5-6. – С.59-69.
12. **Григоров А.Б.** Науково-практичні основи отримання пластичних масил з вторинної сировини [Електронний ресурс]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.17.07 / **Андрій Борисович Григоров**. // *Нац. металург. акад. України*. – Дніпро, 2020. – 40 с.
13. **Swietlik U.** Modification of coking behaviour of coal blends by plasticizing additives / **U. Swietlik, G. Gryglewicz, H. Machnikowska, J. Machnikowski, C. Barriocanal, R. Alvarez, M.A. Dez** // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 1999. – Vol. – 52. – No 1. – P. 15–31. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(99\)00033-9](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00033-9).
14. **Daniela Almeida Streitwieser.** Chemical Recycling of Used Motor Oil by Catalytic Cracking with Metal-Doped Aluminum Silicate Catalysts / **Daniela Almeida Streitwieser, Arturo Arteaga, Alvaro Gallo-Cordova, Alexis Hidrobo, Sebastian Ponce** // *Sustainability*. – 2023. – № 15(13). – 10522. <https://doi.org/10.3390/su151310522>.
15. **Akbar Pribadi.** Utilization of used oil waste for boiler energy source / **Akbar Pribadi, Theresia Prima Ari Setiyani, Tjendro, Budi Setyahandana** // *E3S Web of Conferences*. – 2024. – 475. – 05003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447505003>.
16. **Sakurovs R.** Influence of additives of various origins on thermoplastic properties of coal / **R. Sakurovs** // *Fuel*. – 2009. – V. 88. – Iss. 12. – P. 365-372. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.11.029>.
17. **Сорокін Є.Л.** Розвиток наукових основ внутрішньої будови та властивостей вугілля для розширення сировинної бази коксування [Електронний ресурс]: дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.17.07 / **Євген Леонідович Сорокін** // *Нац. металург. акад. України*. – Дніпро, 2019. – 295 с.
18. **Малий Є.І.** Наукові основи способів модифікації вугілля та вугільних шихт для отримання доменного коксу високої якості [Електронний ресурс]: дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.17.07 / **Євген Іванович Малий** // *Нац. металург. акад. України*. – Дніпро, 2017. – 354 с.
19. **Polyakh O.A.** Comparative analysis of modern trends in the use of industrial wastes of coke chemistry / **O.A. Polyakh, N.S. Ponomarev, A.D. Zhuravlev** // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 411*. – 2018. – 012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012059>.
20. **Книш Ю.О.** Брикетування вугільної шихти перед коксуванням / **Ю.О. Книш, В.І. Саранчук, Е.І. Збикувський** // *Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів: Збірка доповідей VIII Міжнародної наукової конференції аспірантів і студентів. Т. 2* – Донецьк: ДонНТУ, ДонНУ, 2009. – 225 с.
21. **Fernández A.M.** Recycling tyre wastes as additives in industrial coal blends for cokemaking / **A.M. Fernández, C. Barriocanal, E. Díaz-Faes** // *Fuel Processing Technology*. – 2015. – Volume 132. – P. 173-179. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.12.033>.
22. **Collin G.** Co-coking of coal with pitches and waste plastics / **G. Collin, B. Bujnowska, J. Polaczek** // *Fuel Processing Technology*. – 1997. – № 50. – P. 179-184. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(96\)01068-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(96)01068-5).
23. **Zhou Min.** Estimate research on co-carbonization of blend coal with waste plastics / **Min Zhou, Cai-hong Liu, Lei Meng** // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2009. – № 1. – P. 807– 813. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.127>.
24. **Бутузова Л.Ф.** Вплив добавки пластику на процесі термодеструкції сірчистого вугілля / **Л.Ф. Бутузова, Л.М. Ісаєва, Р.В. Маковський, В.М. Шевкопляс, О.С. Булига, Г.М. Бутузов** // *Хімічна технологія*. – 2008. – №137(11). – Розд. 2. – С. 96–101.
25. **Кравець В.А.** Розробка технології утилізації твердих відходів у коксових печах / **В.А. Кравець, В.М. Міхєєнко** // *Екологічна безпека та природокористування*, № 1 (41), 2022. – С. 44-55.

Рукопис надійшов до редакції 29.08.2024 р.

USING OF ORGANIC ADDITIVES IN THE COKING PROCESS OF COAL BLENDS

© **A.B. Grigorov**, Doctor of Technical Sciences (National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine), **O.I. Zelenskyi**, Ph.D. in technical sciences (State Enterprise "Ukrainian State Research Institute for Carbochemistry (UKHIN)", 7 Vesnina str., Kharkiv, 61023, Ukraine)

The article provides an overview of the possibility of using liquid organic materials as fuming and sintering additives in coal blends. A classification of these additives by the type of feedstock is proposed, which includes: prepared hydrocarbon mixtures; commercial products of oil refining and coke production; technologically produced additives obtained exclusively to increase the sinterability of coal blend; various types of waste accumulated in an amount that allows them to be used as relatively cheap sintering additives with simultaneous thermal disposal of hazardous substances. The main requirements for the industrial use of liquid organic additives are formulated, which include low cost; stocks capable of ensuring industrial use; viscosity and structure that ensures convenient transportation and mixing with coal blends; increase in the bulk density of the coal blend during its loading; inertness to the material from which mixing devices and transport devices are made; ability to be evenly distributed over the blend volume; a certain fractional and group chemical composition, which allows participating in the formation of a plastic layer; no negative impact on the quality of chemical coking products; no negative impact on the furnace masonry; non-belonging to Class I or II hazardous substances.

It has been established that the introduction of additives in certain concentrations can improve the coke strength and significantly increase the yield of valuable coking chemical products (in particular, benzene). It has been shown that organic liquid additives with high density can be used as a medium for introducing finely dispersed inorganic powders (e.g., B₄C, SiC, etc.) into the coal blend, which act as volume-modifying additives to produce high-quality metallurgical coke.

Keywords: coking, coal blend, additives, petroleum products, coking chemicals, waste, coke, sintering.

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

АСПЕКТИ ВПЛИВУ НА ВЕЛИЧИНУ ТИСКУ РОЗПИРАННЯ ВУГІЛЬНОЇ ШИХТИ ТА МЕТАЛУРГІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КОКСУ 2. ПРОГНОЗУВАННЯ ТИСКУ РОЗПИРАННЯ ВУГІЛЬНИХ СУМІШЕЙ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОКСУ

© **Д.В. Мірошніченко**¹

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

К.О. Шмельцер², **М.В. Кремер**³

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 Мірошниченко Денис Вікторович, докт. техн. наук, проф., зав. кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива (КТПНГТП), e-mail: dvmir79@gmail.com

² Шмельцер Катерина Олегівна, канд. техн. наук, доц., зав. кафедри «Хімічні технології та інженерія» (КХТИ), e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

³ Кормер Марина Віталіївна, канд. техн. наук, доц., доц. КХТИ, e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

⁴ Ситник Олексій Володимирович, канд. техн. наук, ст. досл., провідн. наук. співр. Коксового відділу, e-mail: alekseysytnik48@gmail.com

⁵ Авдеюк Ілля Миколайович, аспірант (КТПНГТП), e-mail: illia.avdeiuik@iht.khpi.edu.ua

Статтю присвячено причинам виникнення ускладнень при впровадженні та застосуванні спеціальних способів підготовки сировини для коксування (технологія коксування трамбованих шихт, технологія коксування сухої шихти і технологія коксування термічно підготовлених шихт). З однієї сторони, застосування перспективних технологій та технологічних прийомів дає можливість досягти високої якості коксу, при цьому збільшити частку слабоспівного вугілля у складі вугільних шихт, тим самим здешевити її. З іншої сторони, виникає проблема розвитку підвищеного тиску розпирання термічно підготовлених та трамбованих шихт. І тому гостро постає питання оптимізації компонентного складу, прогнозування, контролю та регулювання тиску розпирання з урахуванням властивостей вугільних шихт. Метою досліджень є оцінка можливості прогнозування тиску розпирання вугільних шихт з урахуванням їх технологічних властивостей та петрографічних характеристик, а також вивчення впливу тиску розпирання на металургійні властивості коксу. В роботі використовувалися стандартизовані методи вивчення технологічних властивостей вугілля та вугільних шихт (визначення технічного аналізу, петрографічного аналізу). Вивчення якісних характеристик коксу проводили з використанням фізико-механічних і термохімічних методів дослідження стандартизованих показників: дробимості (M_{25}), стиранності (M_{10}), реакційної здатності (CRI), післяреакційної міцності (CSR). Статистичний аналіз результатів та розробка математичних залежностей були виконані з використанням ліцензійної комп'ютерної програми Microsoft Excel.

Показано можливість прогнозування тиску розпирання вугільних шихт з урахуванням виходу легких речовин шихти, вмісту вітриніту та помелу. Запропоновані регресійні рівняння характеризуються високими коефіцієнтами кореляції (0,89 та 0,9). Їх використання дозволить оптимізувати склад вугільних шихт, контролювати показник тиску розпирання при перешихтовках та скоротити кількість експериментальних вимірювань в умовах конкретного коксохімічного виробництва. Підтверджено механізм впливу тиску розпирання на характеристики міцності коксу. Так, зростання тиску розпирання обумовлює збільшення кількості рідинних продуктів, поглиблення їх взаємодії з розм'якшеними вугільними зернами, що поліпшує спіклівість і коксівність шихти і, як наслідок, підвищення механічної міцності коксу. Встановлено, що при збільшенні тиску розпирання на 1 кПа можна очікувати зростання механічної міцності коксу за показником дробимості M_{25} приблизно на 2,6 %, та зниження стиранності коксу M_{10} на 1 %.

Ключові слова: вугільна шихта, тиск розпирання, петрографічні характеристики, вихід легких речовин, прогнозування, якість коксу.

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

Вступ. Сучасні вимоги до якості доменного коксу залишаються досить високими: механічна міцність за показниками дробимості $M_{25} \geq 88,0-90,0\%$ та стиранності $M_{10} \leq 6,0-6,5\%$; післяреакційна міцність коксу $CSR-60,0-75,0\%$; реакційна здатність коксу $CRI-25-30,0\%$, вміст фракції +80 мм – не більше 5 %; вміст фракції -25 мм – не більше 5 %; коливання вологості обидві сторони – не більше 0,5 % [1]. У досягненні необхідних значень якісних показників коксу вирішальну роль відіграє підбір оптимальних властивостей та складу вугільної шихти. Хоча універсальні моделі умов отримання якісного коксу відсутні, ряд досліджень показує важливе значення певного рівня показників вугільної шихти за мацеральним складом, спіклівістю, складом мінеральної частини, ступенем метаморфізму, вмістом легких речовин, сірки та ін. для формування якості коксу [2, 3]. Згідно з сучасними уявленнями про властивості вугілля та процеси їх перетворення при коксуванні склад вугільних шихт повинен підбиратися за показниками спікання та коксування окремих компонентів, їх технологічних властивостей та особ-

ливостей, відповідно до технології коксування прийнятої на підприємстві (шарове коксування, застосування трамбування, брикетування, термічної підготовки), а також з урахуванням вимог доменного виробництва до якісних характеристик коксу (зольність, вміст сірки, механічна міцність, реакційна здатність, післяреакційна міцність) [4, 5]. Загальновідомим та доведеним численними дослідженнями фактом є адитивність показників технічного, петрографічного та пластометричного аналізів для вугільної шихти та її компонентів.

Тиск розпирання є також одним з найважливіших аспектів промислового коксування, від якого залежать умови експлуатації, стан та строк служби пічного фонду коксохімічного виробництва. А враховуючи, що для досягнення необхідної якості коксу та високої продуктивності коксових печей, сучасною практикою в коксохімічній промисловості є використання вугільних шихт, до складу яких входять до 12 вугільних концентратів різного географічного походження (США, Австралія, Китай тощо) [6] в таких умовах розробка методів прогнозування тиску розпирання залишається актуальним питанням.

Коксоутворення і розвиток пов'язаного з ним тиску розпирання – це складні процеси між генетичними та технологічними властивостями вугілля, на які можуть впливати плинність, в'язкість та газопроникність пластичної маси вугілля, вміст та вихід летких продуктів, умови евакуації паро-газоподібних продуктів (насищеної щільності вугільного завантаження, пористості напівкоксу та коксу). Прогнозування якості коксу дуже часто базується на знанні плинності вугілля, яка у свою чергу використовується для прогнозування тиску розпирання [7, 8]. Існуючі показники для характеристики термопластичних властивостей (дилатометричні показники за методом Одибера Арну – контракція (а) і дилатація (b), максимальна плинність за Гізелером – F_{max}) дають уявлення про поведінку індивідуального вугілля, але в умовах реального процесу коксування вугільної суміші не відображають особливостей її поведінки, яка обумовлена петрографічним складом компонентів і множинними фізичними та хімічними взаємодіями між ними [9].

Пластичність вугільних сумішей при піролізі визначається співвідношенням та взаємним розподілом компонентів. Так, плинність за Гізелером зменшується зі збільшенням вмісту в суміші не спікливого, або слабо-спікливого вугілля. Крім того, плинність має тенденцію до зменшення зі зменшенням розміру частинок не спікливого, або слабо-спікливого вугілля у вугільних сумішах [10].

За даними [11], вивчення з використанням протонного магнітного резонансу термопластичної поведінки 78 бінарних сумішей австралійського коксівного вугілля показало, що зміна термопластичної поведінки ву-

гілля в суміші пов'язана з їх взаємним впливом, перенесенням пластифікуючих летких речовин між вугіллям, взаємодією та рекомбінацією нестабільних радикалів, які утворилися внаслідок деструкції макромолекул. Утворення нових рідких продуктів, перехід у пластичний стан супроводжується перебігом реакцій водневого обміну.

В роботах [12, 13] за допомогою реометрії, термогравіметричного та мікроскопічного аналізів оцінювали плинність та тиск розпирання вугільних сумішей та сумішей пек/вугілля. Встановлено, що змішування низькометаморфізованого вугілля високої плинності з низьким тиском розпирання з високометаморфізованим вугіллям низької плинності, яке розвиває високий тиск коксування, може суттєво знизити тиск розпирання даної вугільної суміші. Причому плинність такої вугільної суміші не є адитивною, а буває меншою, ніж у вугілля з низькою плинністю. Це відбувається тому, що збільшення комплексної в'язкості (η^*) через затвердіння низькометаморфізованого вугілля з високою плинністю протидіє зменшенню η^* в результаті розм'якшення високометаморфізованого вугілля з низькою плинністю. Зазначено, що введення 20-35 % вугілля з вмістом летких речовин (V^{daf}) більше 31,0 % може значно знизити тиск розпирання, що створюється небезпечним вугіллям, або вугільною сумішшю, без значного впливу на якість коксу.

Автори [14] досліджували вплив добавки довгополумєнового газового вугілля (від 1 до 9 %) до основного коксівного вугілля (жирного та коксового) на тиск розпирання при трамбуванні. Тиск розпирання залежить від кількості пластичної маси, яка утворюється при піролізі. Низькометаморфізоване довгополумєнове вугілля має довгі бічні ланцюги та багато місткових зв'язків в макромолекулярній структурі. При піролізі утворює велику кількість газів, і, відповідно малу кількість рідинних продуктів. Зазначено, що зі збільшенням частки вугілля ДГ тиск розпирання вугільної суміші закономірно зменшувався. Зі збільшенням кількості довгополумєнового газового вугілля в суміші до 9 % спостерігали вплив на структуру та якість коксу: збільшувалась його пористість (кількість та розміри пор зростали), що обумовило погіршення механічної міцності.

Механізм зниження тиску розпирання при складанні вугільної шихти або додаванні інертного компонента до суміші запропоновано в роботі [12]. Так, низькометаморфізоване слабо-спікливе вугілля, яке переходить в пластичний стан при нижчій температурі, здатне розширюватися між частинками вугілля більшого ступеню вуглефікації, яке ще не розм'якшилося, і ці порожечки можуть утворювати канали для проходження летючих речовин. Потім, коли високометаморфізоване вугілля починає текти, пори, які утворилися в структурі низь-

кометаморфізованого вугілля можуть полегшити евакуацію летючих речовин. При цьому затверділий матеріал може також виступати як відповідний сорбент для легких речовин.

Складність шихтування та планування складів вугільних шихт з урахуванням тиску розпирання та плинності полягає в тому, що величини не є адитивними. Тому на коксохімічних підприємствах здійснюють експериментальне визначення тиску розпирання вугільних концентратів та вугільних шихт для коксування. Запропоновані рівняння та методики [8, 15, 16] для прогнозування тиску розпирання громіздкі, використання ускладнене через необхідність визначити компонентний склад парогазових продуктів для компонентів шихт, що не завжди можливо в умовах лабораторій коксохімічних підприємств. При введенні нового вугілля з невідомим тиском розпирання виникає необхідність дослідження експериментальних шихт і визначення їх тиску розпирання.

Якість коксу залежить як від компонентного складу вугільної шихти, так й від технології підготовки вугільних концентратів до процесу коксування за такими показниками, як: гранулометричний склад, насипна щільність, вологість, вихідна температура вугільної маси. Останнім часом увага технологів зосереджена на впровадженні та застосуванні спеціальних способів підготовки вугільної сировини для коксування (технологія коксування трамбованих шихт, технологія коксування сухої шихти і технологія коксування термічно підготовлених шихт).

У процесі трамбування вугільної шихти підвищення її насипної щільності відбувається за рахунок взаємного ковзання зерен вугілля, їхньої переорієнтації та зближення [4, 17, 18]. У трамбованому вугільному завантаженні створюються ускладнені умови для евакуації паро-газоподібних продуктів із пластичного шару. Це призводить до підвищення газового тиску. Чим більший газовий тиск, тим активніше паро- та газоподібні продукти піролізу беруть участь у наступних реакціях з органічною масою вугілля, що розкладається. При цьому інтенсифікуються реакції насичення воднем утворюються вільні зв'язки уламків макромолекул (вільних радикалів). Це призводить до збільшення кількості відносно низькомолекулярних сполук, які при певних температурах можуть перебувати в пластичному стані та брати активну участь у процесі спікання. Це дозволяє більшою мірою використовувати спікливий потенціал шихти і отримувати кокс високої механічної міцності з шихт зниженої спікливості [17].

Технологія коксування попередньо висушеної шихти, розроблена компанією Nippon Steel Corporation і застосовується в Японії, в технологічному та апаратурному оформленні реалізована як процес СМС (регулювання вологості шихти), потім удосконалена та впроваджена як DAPS (сушіння та огрудкування шихти) [19,

20]. За технологією СМС вугілля сушать у трубі-сушарці, при цьому його вологість зменшується з 10 % до 5–6 % перед завантаженням у коксову піч [20]. Сутність процесу DAPS полягає у зменшенні вологості шихти до 2 % сушінням у псевдокиплячому шарі. Дрібнодисперсний вугільний пил, що утворився, надходить на огрудкування. Сухе крупне вугілля і огрудковане змішуються і подаються в коксову піч [21]. Технологія термічної підготовки передбачає швидке нагрівання шихти до 150–250 °С перед коксуванням в умовах, які виключають її окиснення і дозволяє отримувати з шихт з високим вмістом високолеткого слабоспікливого вугілля кокс, що перевершує по механічній міцності низькорекційний кокс з кращих вугільних шихт [22].

Зниження вологості вугілля, яке досягається в значених процесах, призводить до збільшення насипної щільності вугілля, збільшення продуктивності коксової печі, підвищення енергозбереження, зростання міцності коксу. Але також встановлено, що висока насипна щільність вугільного завантаження збільшує тиск розпирання та призводить до експлуатаційних проблем. В статті [23] наведені результати досліджень впливу насипної щільності різних марок вугілля на тиск розпирання. Вивчали вплив зміни насипної щільності від 0,85 т/м³ до 1,05 т/м³ на тиск розпирання газового (Laowan), жирного (Longhu) та коксового вугілля (Xinjian та Didao). Результати показали, що при збільшенні щільності з 0,85 т/м³ до 1,05 т/м³ для газового вугілля тиск розпирання змінився не значно і навіть при максимальній щільності становив 3,63 кПа. Коксове вугілля (Xinjian) при збільшенні щільності продемонструвало здатність розвивати тиск розпирання до критичних значень 82,88 кПа, що в 13 разів перевищило значення, зафіксоване при щільності 0,7 т/м³. При цьому пористість коксу з коксового вугілля зменшилася з 63,4 % до 41,5 %. Аналогічно, при зростанні насипної щільності значення тиску розпирання для жирного вугілля Longhu збільшилося в 1,56 рази, а пористість отриманого коксу знизилась з 40,6 % до 20,4 %, для коксового вугілля Didao тиск розпирання збільшився в 11,2 рази, що обумовило зменшення пористості на 25,8 %. Також встановлено, що максимальний тиск розпирання розвиває вугілля з показником відбиття вітриніту $R_0 \geq 1,2$ % (коксове вугілля).

Отже, з однієї сторони застосування перспективних технологій та технологічних прийомів дає можливість досягти високої якості коксу при цьому розширити сировинну базу коксування, збільшити частку слабоспікливого вугілля у складі вугільних шихт, тим самим здешевити її. З іншої сторони виникає проблема розвитку підвищеного тиску розпирання термічно підготовлених, трамбованих шихт. І саме в цьому випадку гостро постає питання оптимізації компонентного складу та прогнозування тиску розпирання з урахуванням властивостей вугільних шихт.

Мета та завдання дослідження. В умовах нестабільності сировинної бази коксування, обмеженості вугільних ресурсів, впровадженні новітніх технологій підготовки вугілля для коксування, а також враховуючи необхідність правильної експлуатації коксових печей та збереження пічного фонду актуальним є питання контролю та регулювання тиску розпирання вугільних шихт, який вони розвивають при коксуванні. Метою досліджень є оцінка можливості прогнозування тиску розпирання вугільних шихт з урахуванням їх технологічних властивостей та петрографічних характеристик, та вивчення впливу тиску розпирання на металургійні властивості кокеу.

Матеріали та методи.

Досліджені вугільні концентрати [24] використовували для приготування вугільних шихт різного компонентного складу (дані в таблиці 1). Основні характеристики та технологічні властивості шихт представлені в таблиці 2.

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” [25].

Для визначення характеристик вугільної сировини використовували стандартизовані методики:

– ISO 1171-97 “Solid mineral fuels. Methods for determination of ash” [26];

– ISO 589-81 “Hard coal—Determination of total moisture” [27];

– ISO 7404-3-84 “Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and an-thracite—Part 3: Method of determining maceral group composition” [28];

– ISO 7404-5-85 “Methods for the petrographic analysis of coals—Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite” [29];

– State standard of Ukraine 7722:2015 “Hard coal. Method of Determining Plastometric Characteristics” [30].

– State standard of Ukraine 8724:2017. Coal and charge based on it. Metod for determination bursting pressure that occurs during coking. Kyiv, Ukraine, 2018 [31].

Зольність (A^d) вугільних шихт знаходилась в діапазоні: 7,0–8,2 %. Вміст загальної сірки (S^d) у шихтах знаходився в межах 0,88–1,44 %. Вихід летких речовин (V^{daf}) на сухий беззолний стан коливався від 31,8 до 33,6 %. Помел вугільних шихт за класом крупності <3 мм знаходився в межах 79–81 %. За петрографічними характеристиками вугільні шихти мали наступні показники: вміст вітриніту 79–82 %, показник відбиття вітриніту 0,94–0,99 %.

Характеристики отриманих коксів (показники технічного аналізу, фізико-механічні властивості, термо-механічні властивості) представлені в таблиці 3, визначались за наступними стандартними методиками:

– State standard of Ukraine ISO 579-2002 “Coke-Determination of total moisture” [32];

– ISO 556-80 “Coke (greater than 20 mm in size)-Determination of mechanical strength” [33];

– ISO 18894:2006 “Coke-Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR)” [34].

Таблиця 1

Компонентний склад вугільних шихт

Проби шихти	Марки вугілля, %			
	Г	Ж	К	ПС
1	45	2	52	1
2	46	3	50	1
3	45	2	52	1
4	46	2	51	1
5	40	6	53	1
6	38	4	57	1
7	43	4	52	1
8	44	4	52	-
9	32	13	54	1
10	31	11	57	1
11	35	10	54	1
12	37	9	53	1

Таблиця 2

Якісні характеристики проб вугільної шихти

Проби шихти	W_t^r , %	A^d , %	S^d , %	V^{daf} , %	Y , мм	R_o , %	V_t , %	P^H , кПа	Вміст класу <3 мм, %
1	10,3	7,7	1,04	32,6	14	0,96	79	7,0	80
2	9,2	7,7	1,10	32,8	13	0,94	80	6,6	80
3	9,5	7,8	1,08	32,6	14	0,97	79	6,8	81
4	9,0	7,0	1,14	33,6	14	0,96	75	6,7	80
5	9,0	7,9	1,11	32,6	15	0,99	79	7,1	81
6	8,8	7,9	1,04	32,1	14	0,97	80	8,1	81
7	10,3	7,9	1,06	32,6	13	0,98	81	7,1	81
8	10,3	7,8	1,05	32,8	14	0,99	79	6,9	81
9	8,5	7,8	0,88	31,8	14	0,96	82	7,9	80
10	8,7	8,2	1,44	31,9	16	0,98	81	8,1	79
11	9,0	7,4	1,23	31,8	15	0,99	80	7,6	79
12	9,3	8,0	1,44	32,5	16	0,95	79	7,3	79

Таблиця 3

Характеристики отриманих коксів

Проба	W_t^r , %	A^d , %	S^d , %	M_{25} , %	M_{10} , %	CRI, %	CSR, %
1	3,5	10,4	0,66	87,0	7,2	40,2	43,3
2	3,5	10,4	0,72	86,4	7,6	41,1	42,7
3	3,4	10,7	0,67	86,4	7,6	41,0	41,7
4	4,6	10,4	0,7	85,9	8,0	43,5	38,3
5	4,7	10,6	0,7	88,0	6,9	41,1	41,8
6	4,7	10,4	0,66	90,0	6,2	40,2	43,0
7	4,8	10,4	0,69	87,7	7,4	41,5	41,7
8	4,7	10,4	0,68	86,0	7,8	40,1	43,4
9	4,8	10,6	0,67	89,0	6,8	37,1	47,6
10	4,8	10,6	0,74	89,0	6,8	39,7	44,6
11	4,8	10,9	0,74	88,0	6,9	38,3	45,7
12	4,8	10,7	0,71	87,5	7,0	40,1	43,4

Результати

Досліджували взаємозв'язки між петрографічними, технологічними показниками якості вугільних шихт та тиском розпирання (табл. 1 та 2), які характеризується відповідними коефіцієнтами кореляції (представлені в табл. 4).

Так, встановлено, що для сумішей також характерний вплив генетичних та технологічних властивостей

на формування тиску їх розпирання при коксуванні. Тісний зв'язок підтверджують високі коефіцієнти кореляції між P^H та V^{daf} , V_t ($r=0,84$ та $r=0,62$ відповідно). Відповідні графічні залежності тиску розпирання від виходу летких речовин (V^{daf}) та показника відбиття вітриніту (V_t) мають лінійний характер, представлені на рис. 1, 2.

Таблиця 4

Коефіцієнти кореляції між тиском розпирання та технологічними та петрографічними характеристиками вугільних шихт

	Г	Ж	К	W_f^r	A^d	S^d	V^{daf}	ВМІСТ класу <3 мм	Y	R_o	Vt	P^H
Г	1											
Ж	-0,94	1,00										
К	-0,81	0,57	1,00									
W_f^r	0,64	-0,58	-0,52	1,00								
A^d	-0,41	0,31	0,48	0,07	1,00							
S^d	-0,34	0,31	0,28	-0,18	0,26	1,00						
V^{daf}	0,85	-0,77	-0,75	0,38	-0,53	-0,10	1,00					
ВМІСТ класу <3 мм	0,57	-0,65	-0,26	0,40	0,00	-0,74	0,26	1,00				
Y	-0,64	0,62	0,50	-0,46	0,32	0,78	-0,36	-0,67	1,00			
R_o	-0,18	0,09	0,34	0,17	0,12	0,07	-0,24	0,23	0,18	1,00		
Vt	-0,66	0,66	0,49	-0,17	0,69	-0,05	-0,84	-0,09	0,09	0,11	1,00	
P^H	-0,90	0,73	0,95	-0,6	0,43	0,18	-0,84	-0,35	0,43	0,20	0,62	1,00

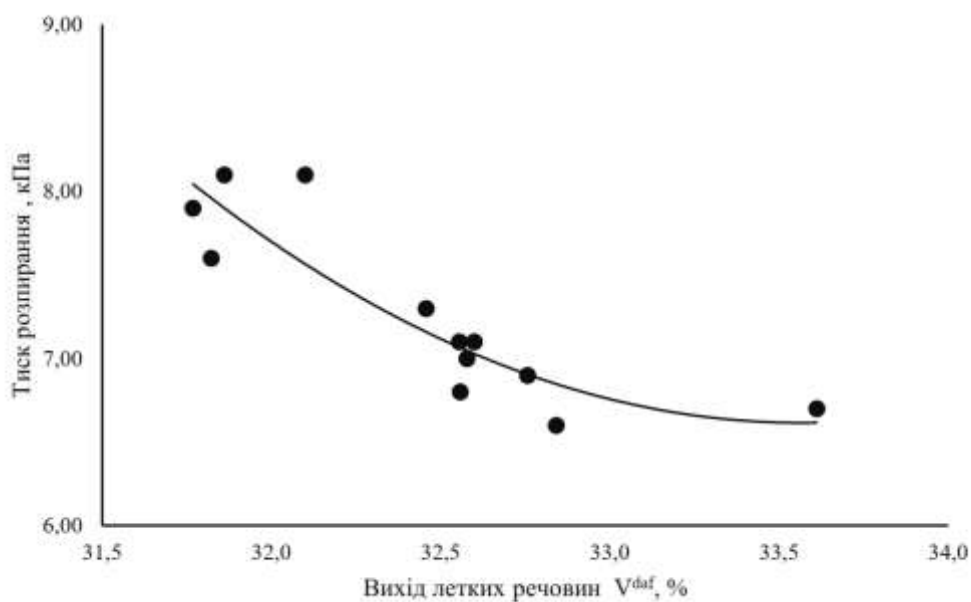


Рис. 1 Залежність тиску розпирання від виходу летких речовин

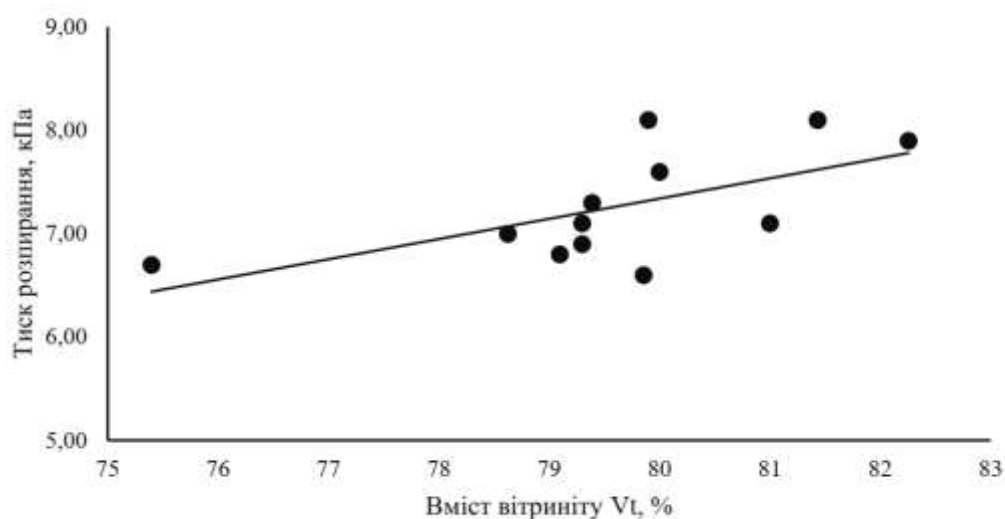


Рис. 2 Залежність тиску розпирання від вмісту вітриніту

Рівняння, які описують отримані графічні залежності, наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Математичні залежності

№	Вид залежності	Статистична оцінка	
		r	D, %
(1)	$P^H = 0,4419 \cdot V_{\text{ш}}^{daf2} - 29,669 \cdot V_{\text{ш}}^{daf} + 504,56$	0,89	79,58
(2)	$P^H = 0,1957 \cdot Vt - 8,3183$	0,62	38,68

Даючи оцінку представленим рівнянням (1) і (2), можна стверджувати, що вони характеризуються високими коефіцієнтами кореляції r (0,84 та 0,62 відповідно).

Встановлено, що при підвищенні виходу летких речовин на 1% спостерігається зменшення тиску розпирання на 0,9 кПа. При збільшенні вмісту вітриніту на 1% фіксували збільшення тиску розпирання на 0,2 кПа.

Для перевірки можливості прогнозування тиску розпирання вугільних шихт використовували регресійне рівняння (1), отримане на основі досліджень властивостей вугільних сумішей (вихід летких речовин, помел), та рівняння (4), (5), розроблені нами [24] за результатами досліджень вугільних концентратів (виходу летких речовин, показника відбиття вітриніту та вмісту вітриніту). Зазначені рівняння наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Регресійні рівняння

№	Рівняння	Статистична оцінка		
		r	D, %	σ , од.
(3)	$P^H = -0,829 \cdot V_{\text{ш}}^{daf} - 0,071 \cdot \gamma_{(3-0 \text{ мм})} + 39,878$	0,85	72,6	0,31
(4)	$P^H = 24,251 \cdot R_0 - 0,00912 \cdot Vt - 12,919$	0,89	78,8	2,96
(5)	$P^H = -0,8285 \cdot V^{daf} + 0,0307 \cdot Vt + 31,986$	0,9	81,2	2,79

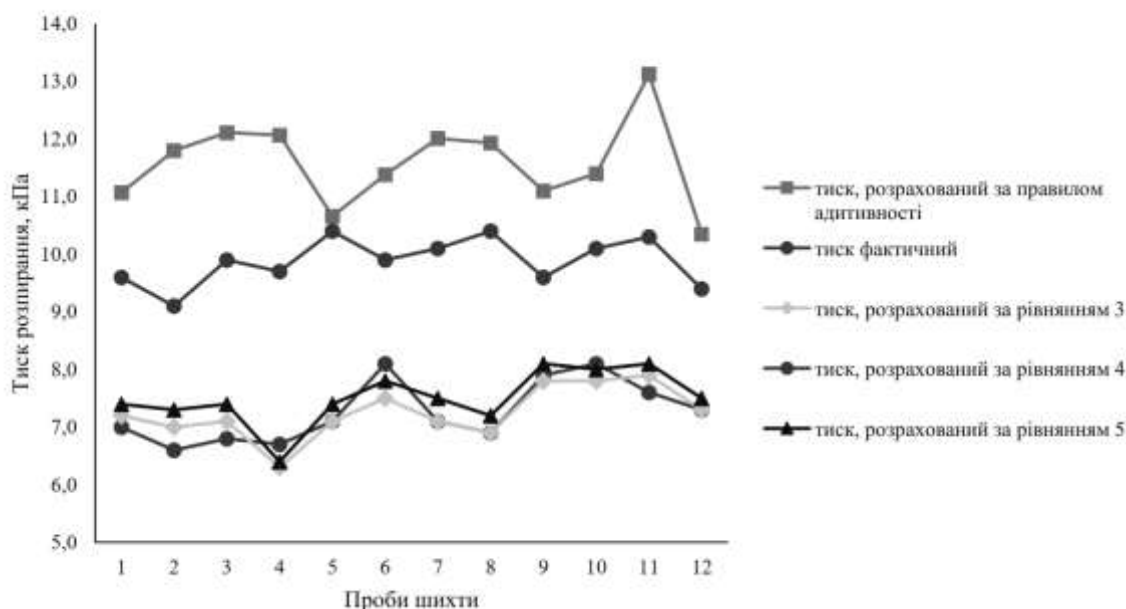
Результати за фактичними даними вимірювань величини P^H , розраховані за правилом адитивності та формулами (3) – (5), представлено в табл. 7.

Порівняння результатів вимірювань та обчислень P^H надано на рис. 3.

Таблиця 7

Значення тиску розпирання за фактичними вимірюваннями, розраховані за правилом адитивності та розраховані формулами (3) – (5)

Проби шихти	Фактичні значення P^H за результатами вимірювань, кПа	Значення P^H , розраховані за правилом адитивності, кПа	Значення P^H , розраховані за рівнянням (3), кПа	Значення P^H , розраховані за рівнянням (4), кПа	Значення P^H , розраховані за рівнянням (5), кПа
1	7,00	11,07	7,2	9,6	7,4
2	6,60	11,80	7	9,1	7,3
3	6,80	12,11	7,1	9,9	7,4
4	6,70	12,07	6,3	9,7	6,4
5	7,10	10,66	7,1	10,4	7,4
6	8,10	11,38	7,5	9,9	7,8
7	7,10	12,01	7,1	10,1	7,5
8	6,9	11,93	6,9	10,4	7,2
9	7,9	11,1	7,8	9,6	8,1
10	8,1	11,4	7,8	10,1	8
11	7,6	13,1	7,9	10,3	8,1
12	7,3	10,4	7,3	9,4	7,5

Рис. 3 Порівняння результатів фактичних, адитивних та прогнозованих значень P^H

Порівнюючи результати обчислень з фактичними результатами вимірювань, необхідно зазначити, що відсутня адитивність показника R^H у багатокомпонентних вугільних сумішах. При чому, значення тиску розпирання R^H , розрахованого за правилом адитивності, у всіх шихтах вище, ніж експериментальні значення. Рівняння (4), яке враховує тільки петрографічні характеристики, дає неточний результат, отримані значення R^H також вище фактичних. Найкращий результат прогнозування фіксували при використанні математичних

моделей, які враховують вихід летких речовин, як основний параметр, та додаткові фактори – вміст вітриніту і помел шихти. Отже, рівняння (3) та (5) можна рекомендувати для прогнозування тиску розпирання.

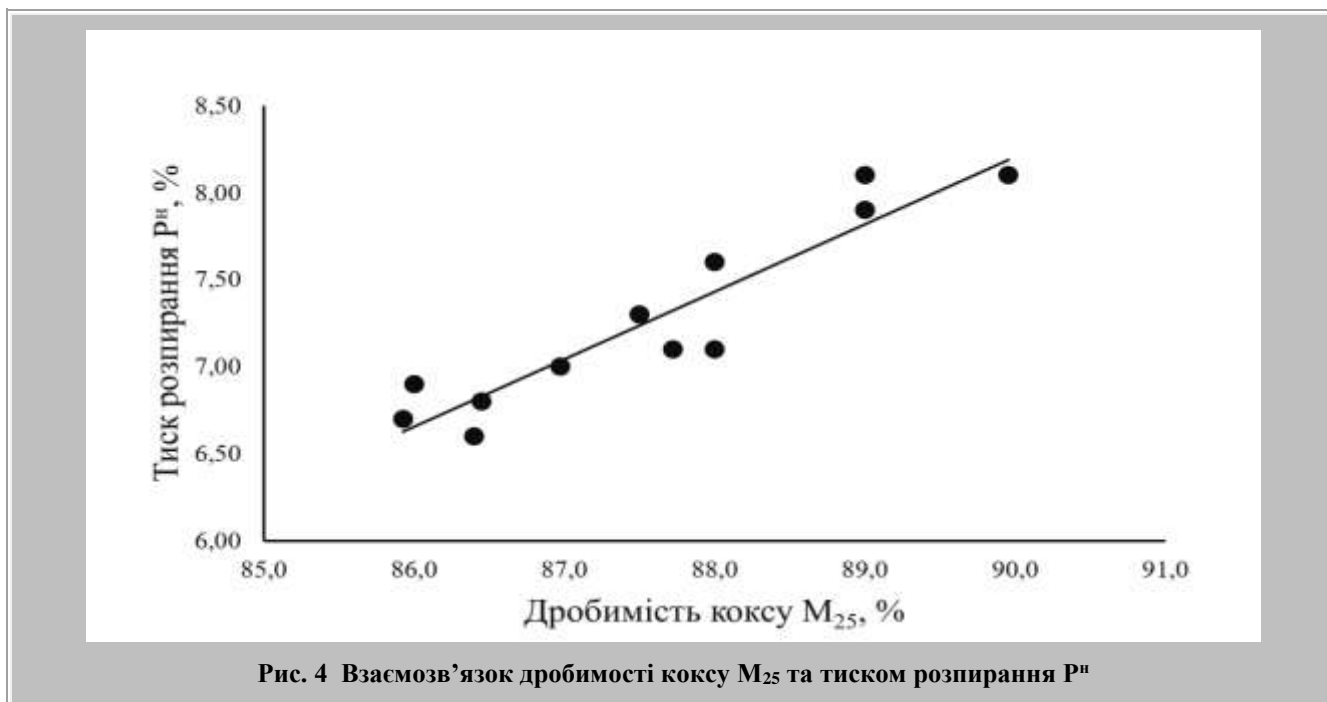
Вплив тиску розпирання на металургійні властивості коксу за показниками механічної міцності (M_{25} , M_{10}) оцінювали за допомогою методів математичної статистики. Так, отримали наступні коефіцієнти кореляції (табл. 8).

Таблиця 8

Коефіцієнти кореляції між тиском розпирання та якісними характеристиками коксів з шихт

	R^H , кПа	M_{25} , %	M_{10} , %
R^H , кПа	1		
M_{25} , %	0,934805	1	
M_{10} , %	-0,87333	-0,94906	1

Графічні залежності наведено на рис. 4 та 5.

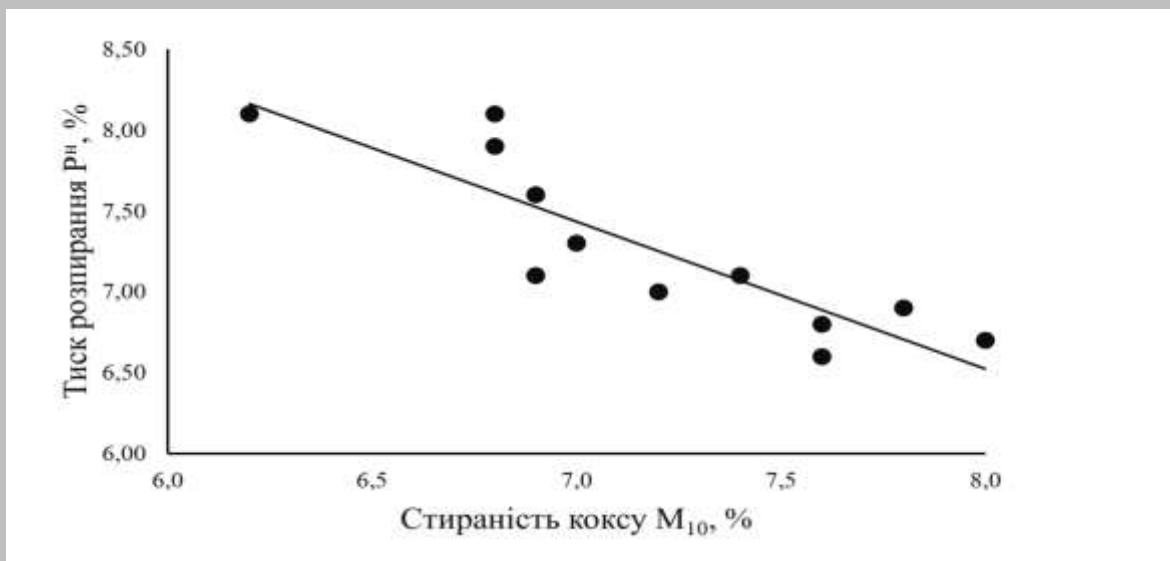


Рівняння, які описують отримані графічні залежності, наведені в табл. 9.

Необхідно зазначити, що підтверджено тісний зв'язок між тиском розпирання та фізико-механічними властивостями коксу для доменної плавки. Математичні моделі мають лінійний характер та високі статистичні оцінки (коефіцієнти кореляції r становлять 0,93 та 0,87).

Зростання тиску розпирання свідчить про ускладнене газовиділення, що збільшує час знаходження продукту

ктив термічної деструкції в пластичному стані та поглиблює взаємодію між ними. Це може призводити до утворення додаткових рідинних продуктів, розм'якшення вугільних зерен та виникнення між ними більш повного контакту, що і обумовлює підвищення механічної міцності коксу. Так, при збільшенні тиску розпирання на 1 кПа можна очікувати зростання механічної міцності коксу за показником дробимості M_{25} приблизно на 2,6 %, та зниження стираності коксу M_{10} на 1 %.

Рис. 5 Взаємозв'язок стираності коксу M_{10} та тиском розпирання P^n

Таблиця 9

Математичні залежності

№	Вид залежності	Статистична оцінка	
		r	D, %
(7)	$M_{25} = 2,58 \cdot P^n + 68,8$	0,93	87,39
(8)	$M_{10} = -1,099 \cdot P^n + 15,17$	0,87	76,27

Обговорення

Результати отримані в роботі узгоджуються з висновками та твердженнями, наведеними в роботах [11-14, 35].

В роботі [35] автори вивчали можливість зниження тиску розпирання шляхом тонкого подрібнення вугілля, яке здатне розвивати високий тиск розпирання, та вплив тонкого подрібнення інертного вугілля на міцність коксу. За результатами досліджень встановили, що тонке подрібнення вугілля, для якого характерний високий тиск розпирання, обумовлює зростання сумарної поверхні вугільних часточок, в наслідок чого збільшується газопроникність пластичного шару, що призводить до зниження тиску розпирання та поліпшення міцності коксу за показником DI_{50}^{150} . Зазначено, що поліпшення міцності коксу пов'язано з тонким подрібнення зерен інертності ($\leq 1\text{mm}$).

В роботах [36, 37] встановлено, що збільшення ступеню подрібнення шихти з суттєвим вмістом опісуючих фюзенизованих компонентів ($\Sigma OK=19-21\%$, $R_o=0,94-0,95\%$) з 82,7 до 90,3 % призводить до деякого зростання плинності пластичної маси (з 100 до 125 ddpm) та тиску розпирання (з 3,4 до 3,7 кПа). Це пояснюється більш рівномірним розподіленням петрографі-

чно неоднорідних вугільних зерен у вугільному масиві та обумовлює зростання міцності коксу за показником M_{25} на 0,6 %. У випадку збільшення помелу для вугільних шихт з високою спікливою здатністю (вміст жирного вугілля $\geq 70\%$, $\Sigma OK=11\%$, $R_o=1\%$) спостерігали значне зменшення плинності пластичної маси (з 335 до 135 ddpm), збільшення її в'язкості і, як наслідок підвищення тиску розпирання з 4,2 до 7,4 кПа. При цьому показник дробимості виріс на 1,8 %, а стираність знизилась на 0,8 %. Так, зростання в'язкості пластичної маси, ускладнює евакуацію парогазових продуктів деформування, збільшує час їх перебування в пластичній зоні, що і обумовлює зростання тиску розпирання.

Треба зазначити, що попри встановлений позитивний вплив тиску розпирання на фізико-механічні характеристики коксу, для забезпечення нормальної експлуатації коксових печей необхідно контролювати та не допускати підвищення тиску вище 7 кПа. Для збереження пічного фонду та отримання доменного коксу з необхідними якісними показниками при наявній вугільній базі придатні різні способи і прийоми, які дозволяють поліпшити ті або інші параметри якості основного продукту та забезпечити оптимальні умови експлуатації устаткування. Головним механізмом являється

оптимізація складу вугільних шихт з урахуванням тиску розпирання та ступеню окиснення кожного компонента суміші. Додатково можна використовувати цілеспрямоване регулювання шляхом введення у вугільні шихти неспікливих добавок: коксовий пил і дрібняк антрациту, напівкоксу, а також неорганічних добавок (дрібнодисперсні оксиди титану, кремнію, заліза і алюмінію) [38, 39]. При введенні окиснюючих добавок пластична маса стає неоднорідною, тому газам, які утворилися при коксуванні, легше евакууюватися, що зменшує їх тиск на стінки камери. Авторами [40] зазначається, що органічні добавки впливають на тиск коксування двома способами: 1) вони збільшують проникність пластичного шару, полегшуючи виділення летких продуктів; 2) вони зменшують загальне розширення або збільшують стиснення шихти.

Так, в роботі [16] наведено результати вивчення впливу коксового дрібняку на тиск розпирання. Показано, що ця добавка є досить ефективним засобом зниження тиску розпирання як насипних, так і трамбованих шихт. Добавка коксового дрібняку (< 3,0 мм) в насипну шихту в кількості до 3,0 % дозволяє знизити тиск розпирання на 12-15 %. На таку саму величину знижується тиск розпирання і трамбованих шихт. При додаванні тонко подрібненого (<0,25 мм) коксового дрібняку в трамбовану шихту в кількості до 7,0 % тиск розпирання знижується на 45-46 %. Аналогічні результати досягаються при додаванні в шихту коксового пилу, який має близький гранулометричний склад (100 % <0,25 мм). Перевагою цього рішення у порівнянні зі збільшенням вмісту в шихті газового вугілля є значно менша кількість добавки, що додає можливість практично зберегти спікливі властивості шихти, а також дещо збільшити вихід цільового продукту (коксу).

В роботі [40] описано вплив добавок вугілля з високим вмістом летких речовин (35,8 %) і напівантрациту до трьох різних марок спікливого вугілля, які характеризуються низьким або середнім виходом летких речовин (17,8 %, 22,6 % та 17,5 %). Органічні добавки виявилися дуже ефективними для зниження тиску коксування вугілля з низькою спікливістю (вугілля А, для якого товщина пластичного шару становила $Y=8$ мм). Але при цьому фіксували зниження міцності коксу. Так, показник DI^{150}_{15} знизився з 82,1 до 76,6 %. У випадку добавки вугілля з високим вмістом летких речовин (HV) до вугілля (В) з кращою спікливою здатністю ($Y=16,5$ мм) спостерігали менше зниження тиску коксування, але відмічали зростання міцності коксу з 85,65 до 86,3 %.

В роботі [41] було вивчено вплив розміру доданого пластику на якість коксу та вплив додавання пластику на тиск коксування. У разі додавання пластику в кількості 2 % міцність коксу DI^{150}_{15} досягла мінімуму при розмірі частинок 10 мм для поліетилену (ПЕ) і 3 мм для полістиролу (ПС). Механізм пояснюється слабкою

структурою коксу, що утворюється на поверхні розділу між пластиком і вугіллям. Результат вказує на те, що великі або малі пластикові частинки є сприятливими для додавання відходів пластику до вугілля для виробництва коксу, не впливаючи на міцність коксу DI^{150}_{15} . Крім того, було також показано, що додавання 1% великих за розміром агломерованих пластикових відходів великого розміру до вугільної шихти не збільшує тиск коксування.

Висновки

1. В роботі використовувалися стандартизовані методи вивчення технологічних властивостей вугілля та вугільних шихт (визначення технічного аналізу, петрографічного аналізу). Вивчення якісних характеристик коксу проводили з використанням фізико-механічних і термохімічних методів дослідження стандартизованих показників: дробимості (M_{25}), стираності (M_{10}), реакційної здатності (CRI), післяреакційної міцності (CSR). Для аналізу впливу сировинних та технологічних факторів на величину тиску розпирання використані методи математичної статистики.

2. Підтверджено взаємозв'язок тиску розпирання від компонентного складу вугільної суміші, виходу летких речовин шихти, петрографічних характеристик (вмісту вітриніту).

3. Показано можливість прогнозування тиску розпирання вугільних шихт з урахуванням виходу летких речовин та показника відбиття вітриніту. Використання запропонованих рівнянь (4) та (6) дає можливість прогнозувати тиск розпирання та оптимізувати склад вугільних шихт, оперуючи даними властивостей вугільних концентратів, які обов'язково визначаються на коксохімічному підприємстві для контролю якості сировини. Використання рівняння для прогнозування тиску розпирання дозволить контролювати показник при перешихтовках та скоротити кількість експериментальних вимірювань тиску розпирання в умовах конкретного коксохімічного виробництва.

4. Підтверджено механізм впливу тиску розпирання на характеристики міцності коксу. Так, зростання тиску розпирання обумовлює збільшення кількості рідинних продуктів, поглиблення їх взаємодії з розм'якшеними вугільними зернами, що поліпшує спікливість і коксівність шихти і, як наслідок, підвищення механічної міцності коксу.

Бібліографічний список

1. *Miroshnichenko D. Factors Affecting the Formation the Carbon Structure of Coke and the Method of Stabilizing Its Physical and Mechanical Properties / D. Miroshnichenko, K. Shmeltser, M. Kormer // C – Journal of Carbon Research. – 2023. – 9 (66). <https://doi.org/10.3390/c9030066M.A>.*

2. **Di 'ez M.A.** Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking / **M.A. Di 'ez, R. Alvarez, C. Barriocanal** // *International Journal of Coal Geology*. – 2002. – Vol. 50. – P. 389–412. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(02\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00123-4).
3. **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.
4. 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 “Інжеск”, 2010. – 536 с.
5. **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 components / **V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim, E.O. Shmeltser, I.A. Lyakhova** // *Petroleum and coal*. – 2019. – Vol. 61(1). – P. 94-99.
6. **Barriocanal C.** Relationship between coking pressure generated by coal blends and the composition of their primary tars / **C. Barriocanal, M.A. Di 'ez, R. Alvarez, M.D. Casal** // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2009. – № 85. – P. 514–520. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.09.007>.
7. **Sciazko M.** Kinetic modelling of coking coal fluidity development / **M. Sciazko, B. Mertas, L. Stepien** // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2020. – Vol. 142. – P. 977-990. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09487-0>.
8. **Leeder W.R.** Predictive model for blending coking coals, Part II. US Coals / **W.R. Leeder, T. Todoschuk, C. Howey, L. Giroux, K.W. Ng, T. MacPhee** / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/283101516_Predictive_model_for_blending_coking_coals_part_2_US_coals.
9. **Tie W.** Relevance between various phenomena during coking coal carbonization. Part 4: Insight into the interaction of coal blending / **Weibo Tie, Junchen Huang, Qi Wang, Xiushi Gan, Songtao Yang, Song Zhang** // *Fuel*. – 2024. – 363(130350). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130350>.
10. **Mochizuki Y.** Some factors influencing the fluidity of coal blends: Particle size, blendratio and inherent oxygen species / **Yuuki Mochizuki, Ryo Naganuma, Kazuya Uebo, Naoto Tsubouchi** // *Fuel Processing Technology*. 2017. – Vol. 159. – P. 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.01.017>.
11. **Sakurovs R.** Interactions between coking coals in blends / **Richard Sakurovs** // *Fuel*. – 2002. – Vol. 82. – P. 439–450. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00312-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00312-5).
12. **Duffy J.J.** Influence of coal thermoplastic properties on coking pressure generation: Part 2 – A study of binary coal blends and specific additives / **John J. Duffy, Merrick R. Mahoney, Karen M. Steel** // *Fuel*. – 2010. – № 89. – P. 1590–1599. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.031>.
13. **Duffy J.J.** Influence of thermoplastic properties on coking pressure generation: Part 1 – A study of single coals of various rank / **John J. Duffy, Merrick R. Mahoney, Karen M. Steel** // *Fuel*. – 2010. – № 89. – P. 1600-1615. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.035>.
14. **Zhao Z.** Effect of mass fraction of long flame coal on swelling pressure and microstructures of cokes / **Zhenning Zhao, Jinfeng Bai, Jun Xu, Yaru Zhang, Xiangyun Zhong, Hongchun Liu, Dekai Yang** // *Journal of Environmental Sciences*. – 2013. – № 25. – P.118–121. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(14\)60639-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(14)60639-2).
15. **Старовойт А.Г.** Про природу розвитку тиску коксування вугільного завантаження / **А.Г. Старовойт, А.С. Коверя** // *Вуглехімічний журнал*. – 2013. – №1. – С. 37-39.
16. **Кузніченко В.М.** Тиск розпирання вугілля та шихт в процесі коксування / **В.М. Кузніченко, І.В. Шулга, О.В. Ситник**. – Харків: Планета-Прінт, 2021. – 210 с.
17. **Ковальов Є.Т.** Теорія та практика виробництва доменого коксу високої якості з трамбованих шихт зниженої спікливості / **Є.Т. Ковальов, Ю.С. Васильєв, В.М. Кузніченко, В.В. Кривоніс, А.Б. Данилов, М.О. Соловійов** // *Вуглехімічний журнал*. – 2009. – № 3-4. – С. 24-30.
18. **Медянець С.А.** Вдосконалення технологічної схеми підготовки вугільної шихти до коксування на ВАТ «Ясинівський КХЗ» / **С.А. Медянець, І.Є. Полуєтков, В.М. Дудяк, В.В. Казаков, І.Д. Дроздник, Д.В. Мірошніченко, Ю.В. Бессчастний** // *Вуглехімічний журнал*. – 2001. – № 1-2. – С. 12-17.
19. **Nomura S.** Recent developments in cokemaking technologies in Japan / **Seiji Nomura** // *Fuel Processing Technology*. – 2017. – Vol.159. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.01.016>.
20. **Nomura S.** The effect of binder (coal tar and pitch) on coking pressure / **Seiji Nomura** // *Fuel*. – 2010. – № 220. – P. 810–816. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.130>.
21. **Zhang L.** Effect of preheating on coking coal and metallurgical coke properties / **Linyang Zhang, Guang Wang, Qingguo Xue, Haibin Zuo, Xuefeng She, Jingsong Wang** // *Fuel Processing Technology*. – 2021. – Vol. 221 (106942).
22. **Васильєв Ю.С.** Про вплив якості коксу, який отримано з термічнопідготовлених шихт, що містять слабоспікльте вугілля, на ефективність доменого процесу з використанням ПВП / **Ю.С. Васильєв, А.І. Горді-**

енко, Г.В. Долгарев, Є.А. Юшков, В.М. Дудяк // Вуглехімічний журнал. – 2008. – № 5-6. – С. 38-40.

23. Bai J. Effect of bulk density of coking coal on swelling pressure / Jinfeng Bai, Chunwang Yang, Zhenning Zhao, Xiangyun Zhong, Yaru Zhang, Jun Xu, Bai Xi, Hongchun Liu // Journal of Environmental Sciences. – 2013. – № 25. – P.205–209. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(14\)60657-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(14)60657-4).

24. Мірошниченко Д.В. Аспекти впливу на величину тиску розпирання та металургійні властивості коксу. 1. Формування тиску розпирання в залежності від властивостей вугільних концентратів / Д.В. Мірошниченко, К.О. Шмельцер, М.В. Кормер, О.В. Ситник, І.М. Авдеюк // Вуглехімічний журнал. – 2024. – №. 5 – С. 34-48. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2024-0-5-34-48>.

25. 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. Technical Committee of Ukraine on standardization TK-92: Kyiv, Ukraine, 2002.

26. ISO 1171-97; Solid mineral fuels. Methods for determination of ash. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1997.

27. ISO 589-81; Hard coal—Determination of total moisture. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1981.

28. 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.

29. 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.

30. State standard of Ukraine 7722:2015; Hard coal. Method of Determining Plastometric Characteristics. State enterprise “Ukrainian scientific research and training center for problems of standardization, certification and quality”: Kyiv, Ukraine, 2015.

31. State standard of Ukraine 8724:2017. Coal and charge based on it. Method for determination bursting pressure that occurs during coking. Kyiv, Ukraine, 2018.

32. State standard of Ukraine ISO 579-2015 “Coke-Determination of total moisture”. State enterprise “Ukrainian scientific research and training center for

problems of standardization, certification and quality”: Kyiv, Ukraine, 2015.

33. ISO 556-80; Coke (greater than 20 mm in size)-Determination of mechanical strength. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1980.

34. ISO 18894:2006 “Coke-Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR)”. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2006.

35. Konno S. Effect of Coal Size on Coking Pressure and Coke Strength / S. Konno, Y. Kubota, S. Nomura, K. Uebo, A. Dobashi // Nippon Steel technical report. – 2020. – № 123. – P. 162-166.

36. Shmeltser E.O. The using of coal blends with an increased content of coals of the middle stage of metamorphism for the production of the blast-furnace coke. Message 1. Preparation of coal blends / E.O. Shmeltser, V. P. Lyalyuk, V. P. Sokolova, D.V. Miroshnichenko // Petroleum and coal. – 2018. – Vol. 60(4). – P. 605–611.

37. Shmeltser E.O. The using of coal blends with an increased content of coals of the middle stage of metamorphism for the production of the blast-furnace coke. Message 2. Assessment of coke quality / E.O. Shmeltser, V. P. Lyalyuk, V. P. Sokolova, D.V. Miroshnichenko // Petroleum and coal. – 2019. – Vol. 61(1). – P. 52-57.

38. Зеленський О.І. Поліпшення якості доменного коксу за допомогою мікропорошків карбїду кремнію / О.І. Зеленський // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Хімія, хімічна технологія та екологія. Теорія і практика. – 2012. – № 48 (954). – С. 62-66.

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

40. Mahoney M. The mechanism of coking pressure generation II: Effect of high volatile matter coking coal, semi-anthracite and coke breeze on coking pressure and contraction / M. Mahoney, S. Nomura, K. Fukuda, K. Kato, A. Le Bas, D. Jenkins, S. McGuire // Fuel. – 2010. – № 89. – P.1557–1565. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.003>.

41. Nomura S. The effect of plastic size on coke quality and coking pressure in the co-carbonization of coal/plastic in coke oven / S. Nomura, K. Kato // Fuel. – 2006. – № 85. – P. 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.05.019>.

Рукопис надійшов до редакції 02.10.2024

ASPECTS OF INFLUENCE ON THE VALUE OF COAL BLEND BURSTING PRESSURE AND METALLURGICAL PROPERTIES OF COKE. MESSAGE 2. PREDICTION OF BURSTING PRESSURE OF COAL BLENDS AND ITS INFLUENCE ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COKE

© **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")

The article is devoted to the causes of complications in the implementation and application of special methods of preparing raw materials for coking (technology of coking rammed blend, technology of coking dry blend and technology of coking thermally prepared blend). On the one hand, the use of advanced technologies and technological methods makes it possible to achieve high quality coke, while increasing the share of low-baking coal in coal blends, thereby reducing their cost. On the other hand, there is the problem of increased bursting pressure of thermally treated and rammed blends. Therefore, the issue of optimising the component composition, predicting, monitoring and controlling the bursting pressure, taking into account the properties of coal blends, is of great importance. The aim of the research is to assess the possibility of predicting the bursting pressure of coal blends taking into account their technological properties and petrographic characteristics, as well as to study the effect of bursting pressure on the metallurgical properties of coke. Standardised methods were used to study the technological properties of coal and coal blends (technical analysis, petrographic analysis). The qualitative characteristics of coke were studied using physical, mechanical and thermochemical methods for the study of standardised indicators: crushability (M_{25}), abrasion (M_{10}), reactivity (CRI), and post-reaction strength (CSR). The statistical analysis of the results and the development of mathematical dependencies were performed using the licensed computer program Microsoft Excel.

The possibility of predicting the bursting pressure of coal blends with regard to the yield of volatile substances in the blend, vitrinite content, and grinding is shown. The proposed regression equations are characterised by high correlation coefficients (0.89 and 0.9). Their use will make it possible to optimise the composition of coal blends, control the bursting pressure during regrinding, and reduce the number of experimental measurements in a particular coke production. The mechanism of influence of the bursting pressure on the strength characteristics of coke was confirmed. Thus, an increase in the bursting pressure leads to an increase in the amount of liquid products, deepening their interaction with softened coal grains, which improves the sinterability and coking properties of the blend and, as a result, increases the mechanical strength of coke. It has been established that with an increase in the bursting pressure by 1 kPa, an increase in the mechanical strength of coke in terms of crushability M_{25} by about 2.6 % and a decrease in the abrasion of coke M_{10} by 1 % can be expected.

Keywords: coal blend, bursting pressure, petrographic characteristics, volatile substance yield, forecasting, coke quality.

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

ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СТУПІНЧАСТОГО ПІДВЕДЕННЯ ПОВІТРЯ У КОКСОВИХ ПЕЧАХ РІЗНОЇ ВИСОТИ

© **С.Ю. Абдулін**¹, **С.Ю. Стельмаченко**², **Г.Е. Коськова**³

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДЕРЖАВНИЙ ІНСТИТУТ ПО ПРОЕКТУВАННЮ ПІДПРИЄМСТВ КОКСОХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ» (ДП «ГИПРОКОКС»), 61002, м. Харків, вул. Сумська 60, Україна

¹ Абдулін Сергій Юрійович, нач. коксового відділу (КВ), e-mail: ko.gpk.ua@gmail.com

² Стельмаченко Станіслав Юрійович, нач. групи КВ, e-mail: sstelm77@gmail.com

³ Коськова Галина Еріківна, головний технолог КВ, e-mail: galina.koskova@gmail.com

Дослідження проводилося з метою виявлення впливу ступінчастого підводу повітря у вертикал коксової печі на кількість оксидів азоту (NOx), що утворюються. Інструментом для дослідження обрано чисельне моделювання за допомогою програми ANSYS-FLUENT. Було побудовано 3D-моделі вертикалів, у яких моделювали процеси горіння опалювальних газів. Відомо, що на обсяги утворення NOx впливає температура у факелі полум'я. Пошук шляхів зниження максимальної температури полум'я у вертикалі без зниження кількості переданого тепла вугільній шихті є перспективним напрямком.

Моделювання різних варіантів конструкції печей різної висоти показало, що таке конструктивне рішення, як рециркуляція, знижує обсяги утворення NOx не менше, ніж удвічі, а організація другого ступеню підведення повітря – додатково на 10-30 % в залежності від розташування другого ступеню по висоті та кількості повітря, що подається на нього. Додавання кожного нового ступеня подачі повітря понад два зменшує ефективність від кожного нового додавання, тому організація двох точок підводу повітря визнана оптимальною. Також знайдено оптимальну висоту розташування другого ступеня підведення вторинного повітря.

Показано, що для печей заввишки до 7 м використання ступінчастого підведення повітря виправдано, якщо воно на додаток до рециркуляції забезпечує рівномірніший прогрів вугільного завантаження по висоті, проте концентрація NOx знижується незначно.

Виявлено, що додавання другого ступеня повітря в печах, нижчих від 7 м, може викликати перегрів верху печей, що призведе до погіршення якості коксу на цих ділянках. Тому впроваджувати ступінчасте підведення повітря у вертикали таких печей слід з обережністю, враховуючи інші фактори, зокрема параметри шихти.

Максимальні температури полум'я під час опалення змішаним газом нижчі, ніж при опаленні коксовим газом, що відкриває більші можливості для зниження NOx у разі використання цього газу.

Ключові слова: коксові печі, батареї, ступінчасте підведення повітря, умови спалювання опалювального газу, рециркуляція продуктів горіння, механізм утворення, термічні оксиди азоту, опалювальна система, обсяги утворення оксидів азоту, вогнетривка кладка.

Автор для листування Г.Е. Коськова, e-mail: galina.koskova@gmail.com

Досягнення мінімально можливого рівня забруднюючих викидів під час роботи коксохімічних заводів набуло ще більшої важливості з огляду на вимоги щодо охорони середовища та норми промислової гігієни. У багатьох країнах світу прийнято нові екологічні нормативи. За даними фірми «POSCO» [1] для сучасних заводів, де впроваджено заходи щодо зменшення NOx (ступінчасте підведення, рециркуляція), концентрації NOx становлять 322 – 414 мг/м³ (150~200 ppm) при 5 % O₂. Для більшості підприємств коксохімічної промисловості, зокрема в Індії, наявне становище із вмістом NOx у продуктах горіння діючих батарей не відповідає екологічним нормам, перевищення встановлених котрих призводить до сплати великих штрафів, а у деяких випадках – до вимог закриття виробництва. У зв'язку з цим є особливо актуальним питання пошуку технологічних і конструктивних рішень, що дозволяють гарантовано забезпечити зниження вмісту NOx у продуктах горіння коксових батарей до рівня встановлених вимог.

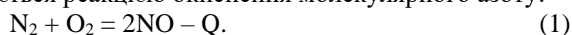
Технологічні методи досягнення цієї мети засновані на зниженні температури та вмісту кисню у зоні активного горіння. Досягти одночасно цих двох ефектів дозволяє, зокрема, рециркуляція продуктів горіння в нижній частині вертикалів, що забезпечує розбавлення горючих компонентів опалювального газу. Зменшити температуру полум'я за рахунок зменшення вмісту кисню в зоні активного горіння дозволяє також ступінчасте по висоті вертикалу підведення повітря або опалювального газу.

Для коксових печей великого об'єму заввишки понад 7 метрів поряд із питанням зниження вмісту оксидів азоту в димових газах особливо актуальним є питання рівномірності прогріву вугільного завантаження за висотою та довжиною опалювального простінка. У зв'язку з цим доповнення до рециркуляції продуктів горіння подачі повітря на двох ступенях дозволить забезпечити більш рівномірний розподіл температури по висоті вертикалів і, відповідно, рівномірну готовність коксу по висоті камери коксування. Разом з цим застосування ступінчастого підведення

повітря в печах різної висоти не завжди виправдане з огляду на рівномірність прогріву вугільного завантаження по висоті, при цьому концентрація NO_x зменшується незначно. Крім того, облаштування додаткового ступеню підведення повітря ускладнює кладку печей і веде до невиправданого подорожчання проекту.

Теоретичні засади утворення NO_x

Оксиди азоту, що утворюються в опалювальній системі коксової батареї, за механізмом утворення поділяються на термічні, паливні та швидкі [2]. Механізм утворення термічних оксидів азоту, що становлять до 60 % від загальної їх кількості, запропонований Я.Б. Зельдовичем [2], вважається основним механізмом утворення оксидів азоту та у спрощеному вигляді описується реакцією окиснення молекулярного азоту:



Зміщення реакції у бік утворення NO відбувається за високої температури та великої концентрації O₂. За літературними даними [2] термічні оксиди азоту утворюються за високої температури у вертикалі у кількості 215 мг/нм³ за таких умов:

– температура на поду вертикалу 1210 °C (α=1,6), оберт печей 22 год;

– температура на поду вертикалу 1240 °C (α=1,5), оберт печей 19 год;

– температура на поду вертикалу 1260 °C (α=1,4), оберт печей 18 год\$

де α - коефіцієнт надлишку повітря.

Паливні оксиди азоту утворюються в результаті згоряння азотовмісних компонентів NH₃ і HCN, що надходять у вертикали здебільшого з прососами сирого коксового газу з камер коксування. Дослідженнями ДП «УХІН» встановлено, що в опалювальній системі ступінь конверсії аміаку і ціаністого водню в NO становить 0,21-0,32 і збільшує вміст NO_x в димових газах, що скидаються, на 30-40 мг/нм³ на кожен відсоток збільшення прососів сирого газу в опалювальну систему.

Швидкі оксиди азота, згідно з дослідженнями Фенімора [2], утворюються в реакціях, що йдуть за радикальним типом. Для їх утворення у факелі горіння повинні утримуватися радикали СН, СН₂, СН₃ та ін., що утворюються під час горіння палив з формулою C_mH_n. За даними ДП «УХІН» при масовій частці в опалювальному газі CH₄ та C_mH_n на рівні 50 % вміст швидких оксидів азоту в димових газах коксової батареї має становити не більше 60 мг/нм³.

У продуктах згоряння змішаного газу немає швидких оксидів азоту через практичну відсутність у газі метану та ненасичених вуглеводнів. Слід зазначити уповільнене (порівняно з коксовим) горіння змішаного газу, водночас температура у факелі змішаного газу більш ніж на 200 °C нижче, ніж у факелі коксового газу.

Звідси – зменшення утворення термічних оксидів азоту. Отже, під час обігріву змішаним газом вміст оксидів азоту в продуктах горіння нижче у 3-4 рази.

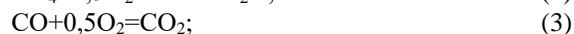
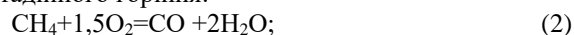
З вищезазначеного можна зробити висновок, що термічні оксиди роблять найбільший внесок у загальну кількість NO_x, і їх зниження можливе у разі зменшення температури у вертикалах. Вище температури 1300 °C спостерігається різке підвищення концентрації NO_x, що утворюються [4].

Проте практичні температури полум'я становлять 1800-1950 °C для коксового газу, і 1600-1650 °C – для змішаного, тобто набагато вище температур, що вимірюються на поду вертикалів (1320-1375 °C), що, безумовно, сприяє активному локальному утворенню термічних NO_x. Вважається, що підвищення максимальної температури у зоні горіння понад 1850 K (1580 °C) призводить до неприпустимо високих викидів NO_x. Одним з основних способів зниження викидів за тепловим механізмом є недопущення утворення осередків високої температури у фронті полум'я.

Моделювання процесу горіння у вертикалах

Для перевірки власних технічних рішень ДП «ГИПРОКОКС» виконав ряд чисельних моделювань за допомогою ANSYS FLUENT, спрямованих на визначення та аналіз розповсюдження полум'я по висоті вертикалу та характеру ділянок утворення NO_x. У якості базової прийнята конструкція вертикалів для печей об'ємом 70,5 м³, висотою 7,6 м, обігрів коксовим газом. Це моделювання розглядає процес горіння як стаціонарний, що не змінюється в часі, тому було задано постійну середню величину теплового потоку від полум'я до шихти.

У розрахунку розглядалися такі основні реакції дво-хстадійного горіння:



Решту реакцій не розглядали при виконанні розрахунку.

Розподіл температур прийнято наступним:

– повітряні входи (з регенераторів) 900 °C;

– газовий вхід 400 °C.

Одним з критеріїв правильності розрахунку є максимальна температура горіння, яка повинна бути в межах, наведених у табл. 1.

Ряд даних для моделей було задіяно з джерела [4].

Очевидно, що саме в зону з максимальними температурами та найінтенсивнішим утворенням NO_x слід подавати вторинне повітря. За роботами І.В.Вірозуба з співавторами висота цієї точки знаходиться приблизно на 1,7 – 1,8 м від поду.

Таблиця 1

Температури горіння газів

Температура горіння, °С	Коксовий газ	Доменний (з додаванням 5-7 % коксового)
нормальна калориметрична	2000-2100	1400-1500
калориметрична	2400-2500	2100-2200
теоретична	2200-2300	1900-2100
практична	1800-1950	1600-1650

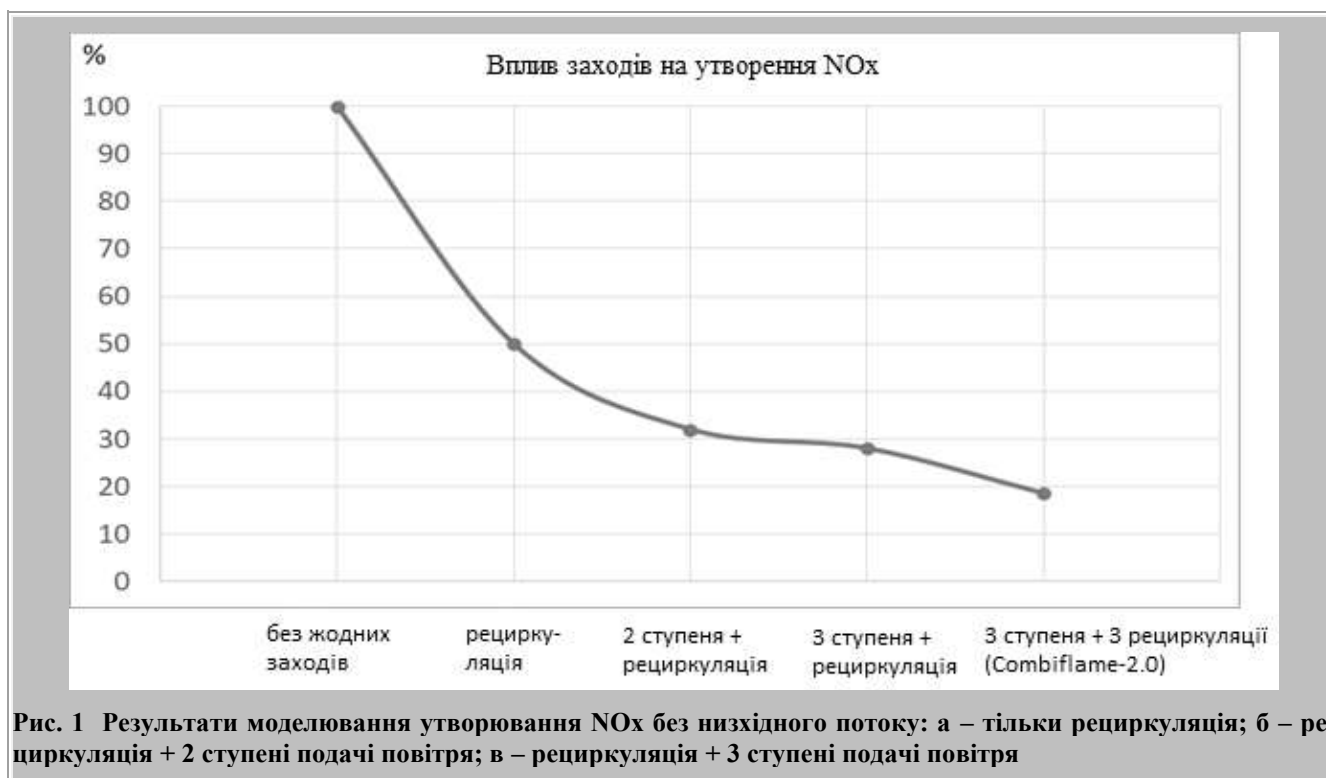


Рис. 1 Результати моделювання утворення NOx без низхідного потоку: а – тільки рециркуляція; б – рециркуляція + 2 ступені подачі повітря; в – рециркуляція + 3 ступені подачі повітря

Спочатку для адекватного обчислення NOx створювалися моделі, які не мають вертикалу з низхідним потоком. Вихід газів з них здійснювався зверху вертикалу з висхідним потоком. На підставі цих моделей було визначено, що найбільший внесок у зменшення концентрації NOx робить рециркуляція (див. рис. 1).

Ділянка утворення максимальних концентрацій NOx зменшується внаслідок застосування ступінчастої подачі повітря незначно порівняно з рециркуляцією. Простежується помітний вплив кількості ступенів підведення повітря на максимальну температуру потоку продуктів горіння. Причому найбільше зниження цієї температури спостерігається у разі переходу від одного ступеню до двох, а додавання третього ступеню знижує температуру продуктів горіння вже з меншою ефективністю.

У загальному випадку використання рециркуляції достатньо для забезпечення вмісту NOx в межах

необхідних норм з мінімальними фінансовими та капітальними витратами. Додавання одного ступеню вторинного повітря є ефективним, а додавання кожного нового ступеню робить все менший внесок у зменшення концентрації NOx.

Обраховано максимальні температури полум'я для печей висотою 7,6 м:

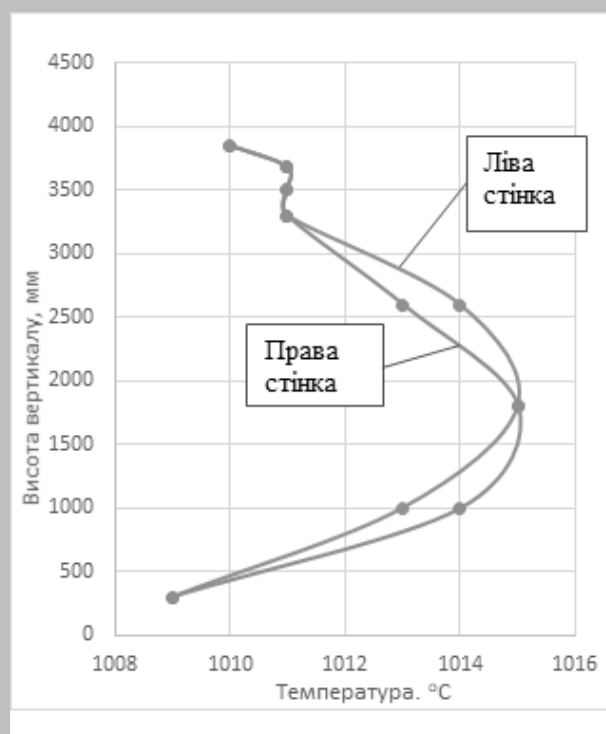
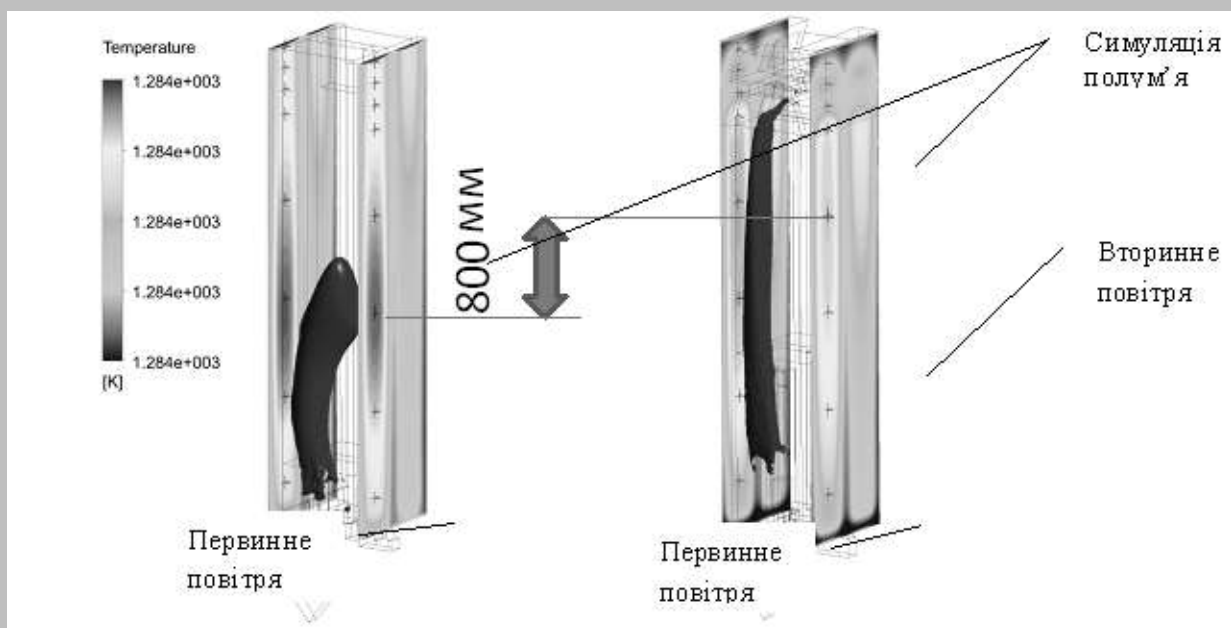
1820 °С – 1 ступінь, рециркуляція;

1760 °С – 2 ступені, рециркуляція;

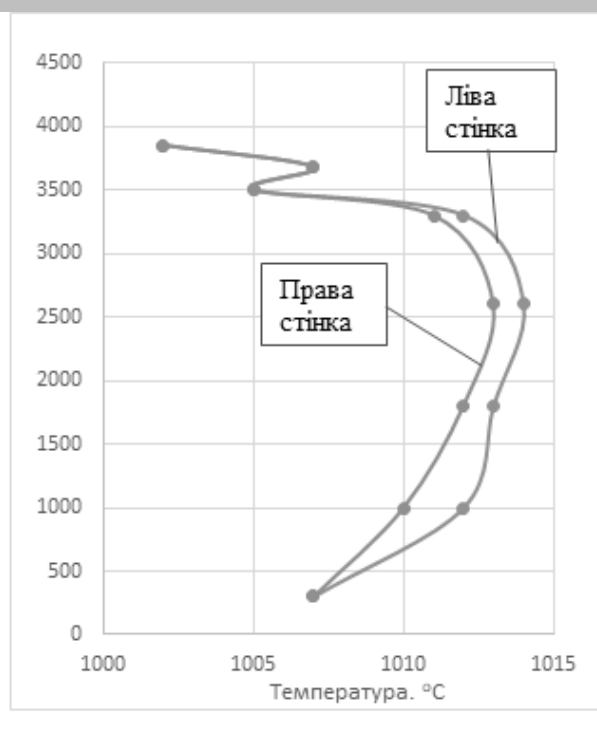
1730 °С – 3 ступені, рециркуляція.

Очевидно, ступінчасте підведення повітря сприяє зниженню температури полум'я. На поду вертикалів температура становила 1250-1270 °С в усіх дослідах. Температура на поду найбільше залежить від температури повітря, що надходить у косі ходи.

Щоб визначити доцільність застосування ступінчастого підведення повітря на печах заввишки менше 7 м, було виконано моделювання полум'я на прикладі печей заввишки 5 м (див. рис. 2).



а



б

Сумарний перетин повітряних входів:
110мм × 95мм (55×95; 55×95), S=0,0152м²

Сумарний перетин повітряних входів:
162мм × 95мм (112×95; 50×95), S=0,0154 м²

Рис. 2 Розподіл температурних полів на стінках, що стикаються з коксом
а – звичайна конструкція; б – зі ступенем вторинного повітря

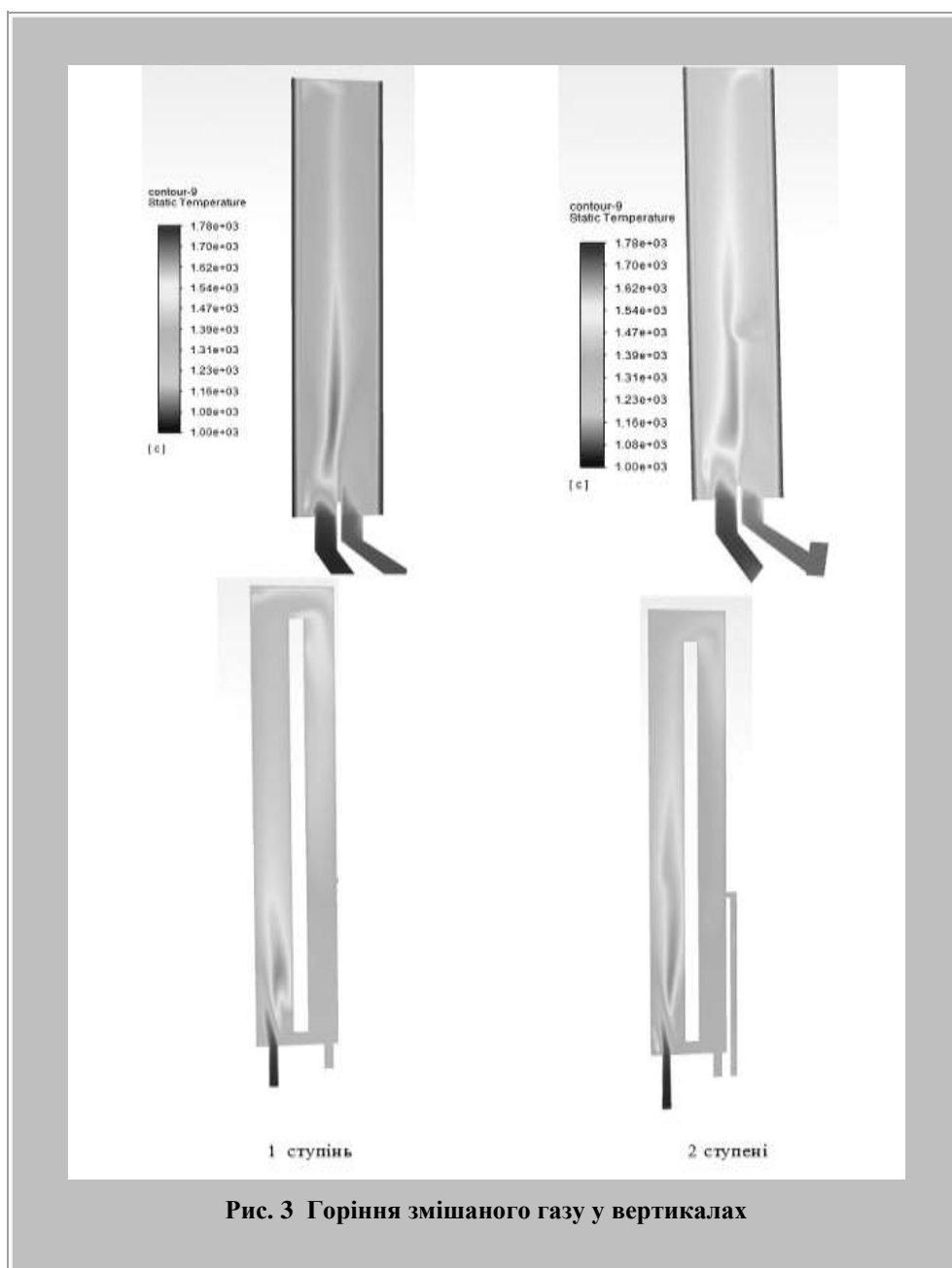
Усі наступні моделі склалися вже з пари вертикалів, не лише висхідного, але й низхідного, стіни камер представлені не віртуально, а в явному вигляді, що в цілому наближує модель до реальних вертикалів. Усього застосовувалось по два ступені подачі повітря.

В моделі вертикалів для печей заввишки 5 м вивчалася конструкція зі ступенем вторинного повітря, що являє собою косий хід, подовжений вище поду вертикала (рис. 2 б). Результати порівнювали зі звичайною

традиційною конструкцією, оснащеною одним ступенем (рис. 2 а).

У разі двохступінчастого підведення повітря полум'я стелиться вздовж вертикальної стіни, розташованої ближче до косоного ходу, що виходить на під вертикала (рис. 2 б), і витягується по висоті помітно краще, ніж у разі одноступінчастого підведення.

Максимальна температура полум'я у разі двохступінчастого підведення виявилася нижчою, ніж при одноступінчастому на 40 °С (рис. 2): а – 1815 °С; б – 1775 °С.



Однак у разі застосування ступінчастого підводу спільно з рециркуляцією для печей такої висоти пік максимальної температури переноситься ближче до верху печей, факел надто витягнутий вгору, і виникає ймовірність перегріву верхньої частини коксового пирога та нижнього недогріву (рис. 2). Тобто порушується рівномірність обігріву пирога по висоті. Таким чином, доцільність застосування ступінчастого підведення повітря у поєднанні з рециркуляцією для печей заввишки 5 м є сумнівною.

Наступними дослідженнями виконано моделювання горіння змішаного газу на прикладі нового проекту для коксової батареї із комбінованим обігрівом, з технологією коксування трамбованої шихти. Висота камери складає 6,25 м. Повітря на другий ступінь надходить каналом усередині біндера, що розділяє пари вертикалів. Фактичний розподіл повітря між ступенями у разі роботи на змішаному газі становив 65/35 % (а не очікувані 50/50 %). Однак, у разі обігріву лише змішаним газом, отримане співвідношення вважається близьким до оптимального.

Порівнювалися конструкції: з двома ступенями подачі повітря та з традиційним одним (див. рис. 3).

На рис. 3 видно, що у варіанті з двома ступенями полум'я помітно витягується вгору в порівнянні з одним. Максимальна температура полум'я знизилася з 1712 до 1700 °С. У варіанті з одним ступенем подачі повітря точка з максимальною температурою знаходиться на висоті 1,2 м від поду. За рекомендацією ДП «УХІН» саме на ділянці з максимальною температурою слід подавати вторинне повітря для зниження піку температури. У цій моделі висота розташування другого ступеню спочатку була прийнята 2,0 м. Водночас висота від низу вертикала, на якій виявилася пікова температура, дорівнювала 1,7 м. Кількість продуктів горіння, що рециркулюють через нижні вікна, склала для варіанта з одним ступенем 29,0 %, з двома – 27,6 %, тобто практично однаково.

На стінах при варіанті з двома ступенями область підвищених температур розтягнута вгору, покращуючи рівномірність обігріву (див. рис. 4).

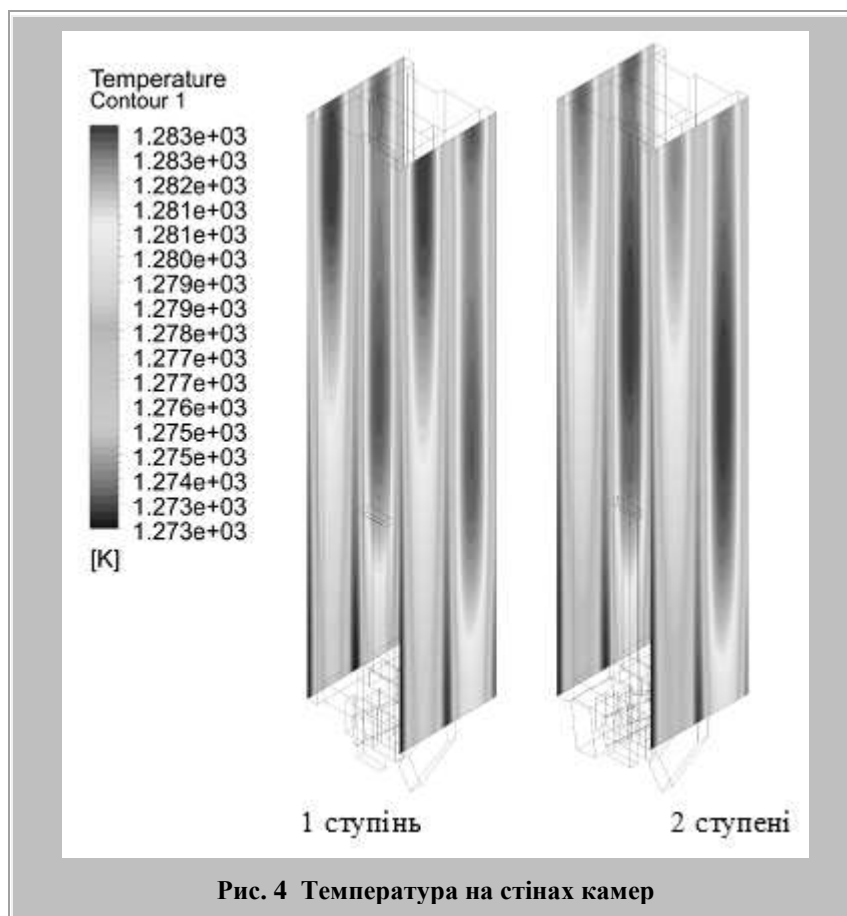
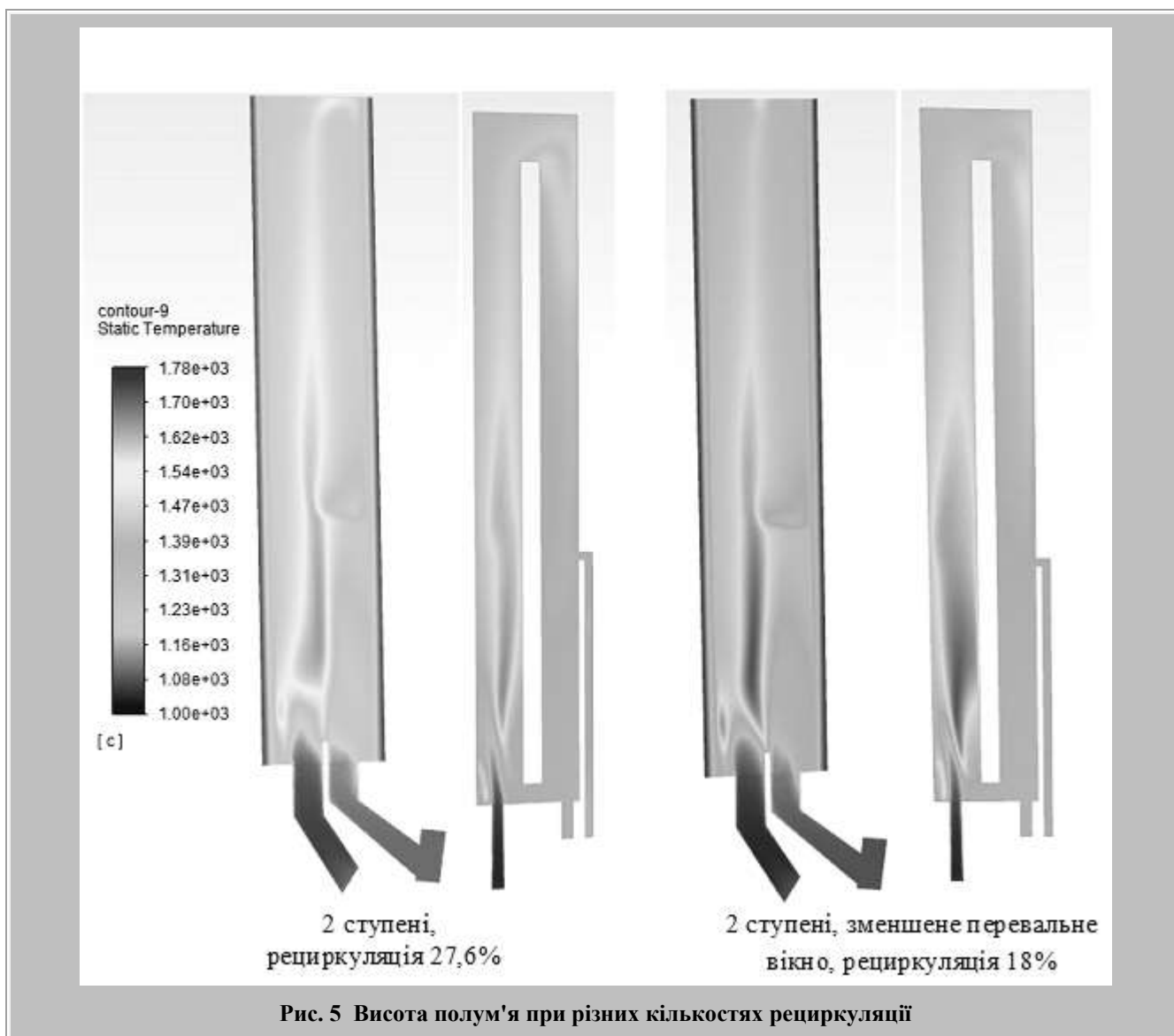


Рис. 4 Температура на стінах камер

Незважаючи на все вищенаведене, у цих двох варіантах концентрація NOx виявилася практично однаковою.

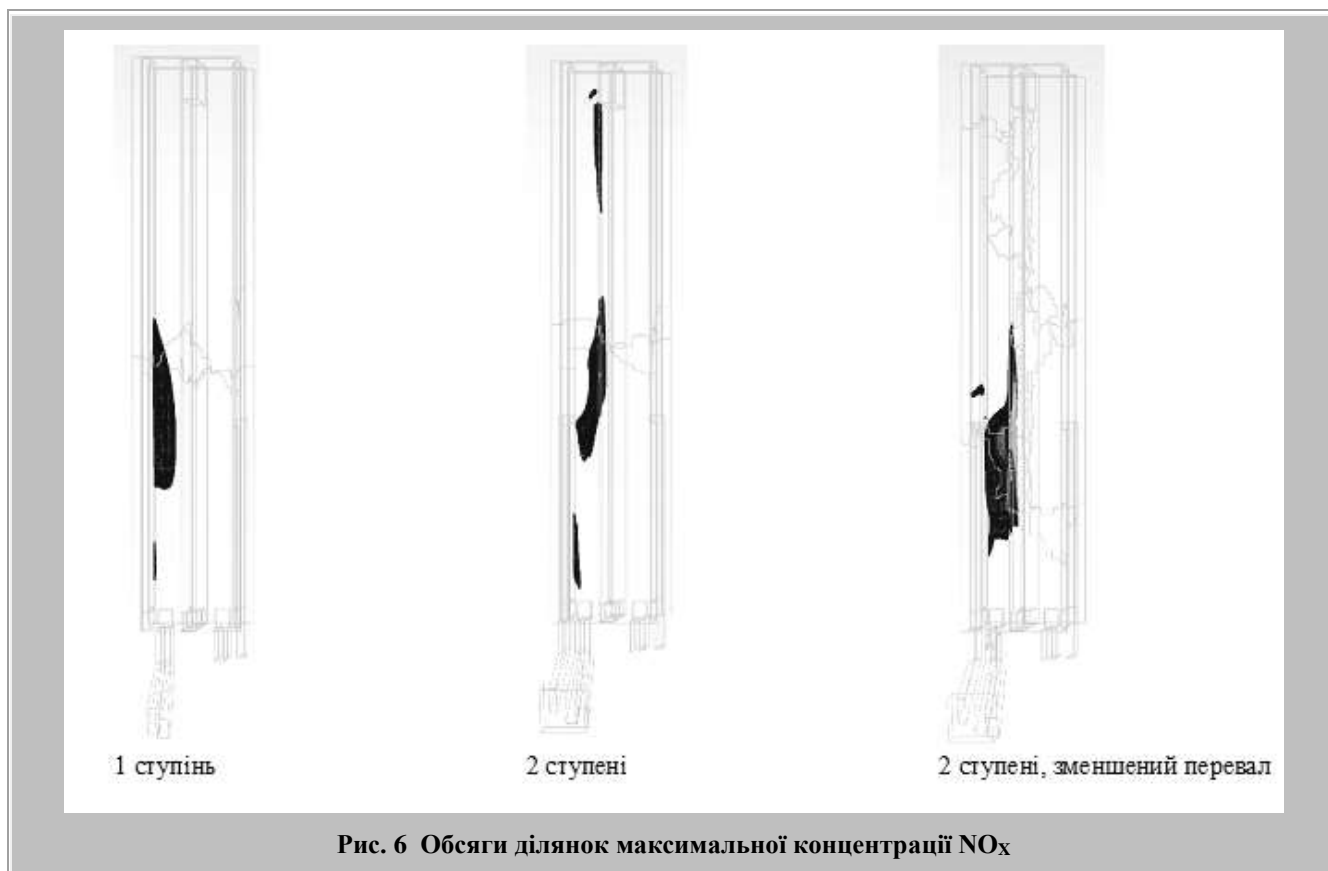
Чим менші розміри отворів, прорізів у кладці, тим вона міцніша. Тому розглядався варіант зі зменшеним перетином перевального вікна з $0,21 \text{ м}^2$ до $0,15 \text{ м}^2$, з двома ступенями подачі повітря. Рециркуляція продуктів горіння через нижні вікна в цьому випадку, як і слід

очікувати, зменшилася до 18 %. Максимальна температура полум'я помітно зросла з 1712 до 1778 °C. Порівняно з попереднім варіантом із двома ступенями висота полум'я зменшилася незначно (див. рис. 5), але концентрація NOx зросла майже вдвічі, про що також свідчить помітно більший обсяг області максимальної концентрації NOx (див. рис. 6).



Таким чином, встановлено, що рециркуляція має найбільший вплив на зменшення NOx. Ступінчасте підведення забезпечує гарне витягування полум'я по

висоті, але не так ефективно впливає на концентрацію NOx. Зменшувати кількість рециркулюючих газів менше 30 % не рекомендується.



У цьому випадку для печей висотою 6,25 м, застосування ступінчастого підведення повітря доцільно для забезпечення рівномірності обігріву по висоті печей. Зниження концентрації NO_x здійснюється в основному за рахунок рециркуляції продуктів горіння

Висновки

1. Дослідженнями встановлено, що кількість температурних оксидів азоту, що утворюються, в 5-6 разів перевищує кількість паливних. Тому є доцільним, насамперед, зменшення утворення температурних оксидів, що досягається зниженням температури полум'я.

2. Головним інструментом, що подовжує полум'я і знижує утворення NO_x (не менше ніж у 2 рази), є рециркуляція. Кількість продуктів горіння, що рециркулюють, має бути не менше 30 %. Ступінчасте підведення повітря також сприяє зменшенню NO_x, але меншою мірою. Організація одного ступеню вторинного повітря в поєднанні з рециркуляцією знижує NO_x на ~20 %, подальше збільшення кількості ступенів дає все менше зниження NO_x, а поєднання двох ступенів з додатковими рециркуляційними і перевальними вікнами (за принципом Combiflame – 2.0)

дозволяє досягти найменшого вмісту оксидів азоту у продуктах горіння.

3. Додавання ступенів вторинного повітря подовжує полум'я за висотою. Однак для печей висотою ≤ 5 м, що обігріваються коксовим газом, підведення у поєднанні з рециркуляцією призведе до перегріву верху коксового пирога. Тому ступінчасте підведення можна рекомендувати для печей, що обігріваються коксовим газом, висотою ≥ 7 м, без зменшення кількості рециркулюючих продуктів горіння. Для печей заввишки 6,25 м, які обігріваються змішаним газом, додавання вторинного повітря створило позитивний вплив на вирівнювання полум'я по висоті. Необхідність використання другого ступеня підведення повітря має розглядатися в цьому випадку одночасно з особливостями шихти, що коксується.

Бібліографічний список

1. Yang, Sung-Jae. NO_x emission control for Coke Oven. Application of Two-Stage combustion to the single-stage combustion chamber / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.seaisi.org/storage/adminUploads/newsroom/NR_5d0446cb0de8d.pdf.

2. Фідчунов А.Л. Динаміка утворення різних видів оксиду азоту в опалювальній системі коксової батареї / А.Л. Фідчунов, А.П. Гринь // Вуглехімічний журнал. – 2011. – № 1,2. – С. 48-54.

3. Neuwirth R. Potentials and Limitations with respect to NO_x-Reduction of Coke Plants / R. Neuwirth, F. Huhn, R. Kim, A. Górski / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://d2zo35mdb530wx.cloudfront.net/legacy/UCPthyssenkruppBAIS/assets/files/download_1/cok

[e_plant/12th_china_congress_zhengzhou_2014_text_for_proceeding.pdf](#)

4. Nowak A.J. CFD model of coupled thermal processes within coke oven battery as an example of complex industrial application / A.J. Nowak, J. Smolka, A. Fic, L. Kosyrczyk // Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences. – 2010. – № 17 (2). – P. 161–172.

Рукопис надійшов до редакції 09.07.2024 р.

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-6-27-36

Specialty 161. U.D.C. 662.741.3

FEASIBILITY OF APPLICATION OF STEP-BY-STEP AIR SUPPLY IN COKE OVENS OF DIFFERENT HEIGHTS

© S.Yu. Abdullin, S.Yu. Stelmachenko, H.E. Koskova (STATE ENTERPRISE "STATE INSTITUTE FOR DESIGNING ENTERPRISES OF COKE OVEN AND BY-PRODUCT PLANTS" (SE "GIPROKOKS"), 60 Sumsk str., Kharkiv, 61002, Ukraine)

The research was carried out with the aim of identifying the impact of a step-by-step approach air into the vertical of the coke oven by the amount of nitrogen oxides formed.

Numerical modeling using ANSYS-FLUENT programs. 3D models of verticals were built, in which the combustion processes of heating gases were simulated.

It is known that the amount of NO_x formation is affected by the temperature in the flame. Searching for ways to reduce the maximum flame temperature in the vertical without reducing the amount of heat transferred to the coal charge is a promising direction.

Modeling of various options for the design of furnaces of different heights showed that recirculation reduces the amount of NO_x formation by no less than half, and the organization of the second stage of air supply - by an additional 10-30 %, depending on the location of the second stage in height and the amount of air supplied to it. Adding each new air supply stage beyond two reduces the efficiency from each new addition, so the arrangement of two air supply points has been considered as optimal. The optimal height of the location of the second stage of secondary air supply has been also found.

For furnaces up to 7 meters high, the arrangement of a staged air supply is justified if, in addition to recirculation, it ensures a more uniform heating of the coal load in height, but the concentration of NO_x is slightly reduced.

It has been found that the addition of the second stage of air in the ovens of small height, less than 7 m, can cause overheating of the top of the furnaces, which will lead to deterioration of the quality of coke in these areas. Therefore, step-by-step air supply to the verticals of such furnaces should be implemented with caution, taking into account other factors, in particular, the parameters of the charge.

Maximum flame temperatures when heated with mixed gas are lower than those for coke gas, which opens up greater opportunities for reducing NO_x when using this gas.

Keywords coke ovens, batteries, step-by-step air supply, heating gas combustion conditions, recirculation of combustion products, mechanism of formation, thermal nitrogen oxides, coke ovens heating system, reduction of nitrogen oxide formation volumes, refractory brickwork.

Corresponding author H.E. Koskova, e-mail: galina.koskova@gmail.com

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-6-36-41

Спеціальність 051, 161. УДК 338.3:662.749.2

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ СУХОГО ГАСІННЯ КОКСУ

© С.О. Кравченко¹, А.О. Цимбал², С.В. Чаплянко³, С.В. Сухорукова⁴

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@gipkokoks.com

² Цимбал Андрій Олександрович, головний інженер проекту, e-mail: gipkokoks@gmail.com

³ Чаплянко Світлана Володимирівна, канд. техн. наук, с.н.с., учений секретар, e-mail: chaplianko_sv@ukr.net

⁴ Сухорукова Світлана Володимирівна, заст. нач. техніко-економічного відділу, e-mail: teo.gpk.ua@gmail.com

У рамках розробки науково-технічної документації з реконструкції об'єктів комплексу коксової батареї в умовах одного з найбільших підприємств з виробництва коксу для металургії та одного з найбільших експортерів хімічної продукції в Україні виконано аналіз економічної ефективності впровадження технології сухого гасіння коксу. Основними питаннями, що вимагали вирішення через здійснення реконструкції, були: покращення якості коксу, збільшення ефективності виробництва коксу, зменшення шкідливих викидів у навколишнє природне середовище. Даним проектом передбачено впровадження нових технічних рішень ДП «ГИПРОКОКС» з удосконалення технологічних вузлів установки сухого гасіння коксу (УСГК) і пилоочисних установок (із сухим 2-х ступінчастим очищенням), які спрямовані на підвищення ефективності роботи УСГК і зниження викидів, а також заходи щодо забезпечення покращення умов і безпеки праці виробничого персоналу.

Показано, що сума капітальних вкладень у будівництво УСГК (з урахуванням турбогенератора) у 14,7 разів більша, ніж у будівництво комплексу мокрогасіння. Встановлено, що за технологією сухого гасіння коксу експлуатаційні витрати на 1 т коксу більші у 17,5 разів, порівняно з технологією мокрогасіння.

При визначенні економічної ефективності УСГК враховували переваги сухого гасіння з майбутньої економії, а саме: збільшення доходу від реалізації товарного коксу, зниження витрат коксу у доменному виробництві, реалізація товарних ресурсів електроенергії власного виробництва та додаткових ресурсів пари низького тиску власного виробництва, додаткової кількості товарного коксового газу.

Доведено економічну ефективність впровадження технології сухого гасіння коксу: бездисконтний термін окупності менше за період реалізації проекту на 17 років (життєвий цикл УСГК дорівнює життєвому циклу коксових печей і за проектом складає 20 років), а розрахунковий рівень простої рентабельності інвестицій вище на 14,8 % за нормативний.

Завдяки ефективним технічним рішенням, отримані технічні здобутки вдалося успішно впровадити при розробці науково-технічної документації для одного українського і трьох закордонних замовників.

Ключові слова: капітальні вкладення, бездисконтний термін окупності, проста рентабельність, коксохімічне виробництво, реконструкція, коксова батарея, гасіння коксу, УСГК.

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

Ефективність діяльності промислових підприємств значною мірою залежить від їх можливості збільшувати виробничі потужності, впроваджувати нові технічні рішення та інноваційні технології, покращувати енергоефективність, мінімізувати рівень шкідливого впливу на навколишнє середовище [1, 2]. Наукова установа ДП «ГИПРОКОКС» аналізує, розробляє, удосконалює і впроваджує сучасне обладнання і прогресивні технології, що забезпечують підвищення ефективності діяльності коксохімічних виробництв. Питання економічної ефективності при цьому завжди є актуальним.

Метою даної статті є визначення економічної ефективності будівництва промислового об'єкту – комплексу об'єктів сухого гасіння коксу (2-х камерна установка УСГК з турбогенератором) в умовах одного з найбільших вітчизняних підприємств-виробників коксу для металургії та одного з найбільших експортерів хімічної продукції в Україні.

Слід зазначити, що:

1. Першочергова задача замовника будівництва полягала у вирішенні проблем технологічного (покращення якості коксу, збільшення ефективності виробництва коксу) та екологічного (зменшення шкідливих викидів у навколишнє середовище відповідно до вимог екологічних норм [3, 4]) характеру;

2. Технологія сухого гасіння коксу, порівняно з мокрим, має наступні переваги [5]:

– утилізація від 40 до 50 % тепла, що витрачається на виробництво коксу;



– отримання пари енергетичних параметрів у кількості 0,45 - 0,50 тонни на одну тонну погашеного коксу (використовується для технологічних потреб у системі паротеплопостачання підприємства або для виробництва електроенергії);

- скорочення шкідливих викидів в атмосферу;
- зниження витрат коксу в доменному процесі та підвищення продуктивності доменних печей за рахунок поліпшення показників якості металургійного коксу за механічною міцністю, реакційною здатністю, гранулометричним складом, вмістом вологи;
- зниження витрат на ремонт коксовозних вагонів і транспортних витрат на перевезення коксу;
- відсутність витрат тепла на випаровування вологи в доменних печах;
- виключення корозії устаткування і металоконструкцій, яка виникає в зоні впливу краплинного виносу при мокрому гасінні;
- збільшення виходу коксу з камери.

Окрім переваг технології сухого гасіння коксу, у даному випадку слід враховувати впровадження нових технічних рішень ДП «ГИПРОКОКС» з удосконалення технологічних вузлів УСГК і пилоочисних установок (із сухим 2-х ступінчастим очищенням), які спрямовані на підвищення ефективності роботи УСГК і зниження викидів. Проектом передбачено заходи по забезпеченню покращення умов і безпеки праці виробничого персоналу.

Метод дослідження – бездисконтний термін окупності (Payback Period, надалі T_o), проста рентабельність інвестицій (Simple Rate of Return, надалі P).

Академічна економіка вважає, що T_o (як і інші статичні показники) може бути використаний лише в системі допоміжних показників оцінки ефективності інвестиційних проектів, або як один з допоміжних критеріальних показників на стадії відбору інвестиційних проектів у інвестиційну програму підприємства. Проте, практичний досвід ДП «ГИПРОКОКС» із визначення економічної ефективності будівництва промислових об'єктів свідчить, що в умовах економічної нестабільності (за відсутності точного прогнозу зміни вартості грошей у часі, коли інфляція з початку року вимірюється двозначними показниками, тощо) при доведеній технологічній і/або технічній і/або екологічній доцільності проекту для обґрунтування його економічної ефективності застосування показника T_o є цілком достатнім.

Розрахунки виконано при порівнянні двох технологій гасіння коксу – сухого і мокрого. При цьому для виробництва коксу використовується шихта однакового складу.

T_o , виражений у роках, визначали за формулою:

$$T_o = K / P, \quad (1)$$

де K – сукупна сума вкладених засобів (капіталовкладень, інвестицій) у проект; P – чистий прибуток в середньому на рік (середньорічний фінансовий потік від реалізації продукції).

Недоліками даного методу є: неврахування впливу доходів останніх періодів і відмінності між проектами з однаковою сумою кумулятивних доходів за різним розподілом цієї суми по роках, відсутність властивості адитивності [6].

P усього інвестованого капіталу, виражену у відсотках, розраховували за формулою:

$$P = (P / K) \times 100, \quad (2)$$

де P – чистий прибуток в середньому на рік; K – сукупна сума вкладених засобів у проект.

Недоліком даного методу є неврахування впливу часу на грошові потоки – інвестований капітал порівнюється з прибутком, який одержує підприємство через декілька років [7].

Для виконання розрахунків використали відомості, зазначені у звітних даних замовника. Розрахунок суми матеріальних і енергетичних витрат виконували за кожним елементом витрат множенням кількості витраченого ресурсу у натуральному вираженні на ціну за його одиницю. Витрати на оплату праці визначали, виходячи з чисельності обслуговуючого персоналу і рівня їх заробітної плати. Відрахування на соціальні заходи розраховували у відсотковому відношенні до загальної суми витрат на оплату праці працівників. Єдиний соціальний внесок на загальнообов'язкове державне соціальне страхування складав 22 %. Суму амортизаційних відрахувань визначали, виходячи з прийнятої середньої норми амортизаційних відрахувань для об'єктів коксохімічного виробництва у розмірі 10 % від суми (вартості) капітальних вкладень, передбачених у главах 2-7 зведеного кошторисного розрахунку (по об'єктах основного виробничого призначення). Відрахування на ремонт і утримання основних засобів прийнято у розмірі 3 % від кошторисної вартості обладнання (згідно зведеного кошторисного розрахунку). Інші виробничі витрати (загальновиробничі витрати) прийнято у розмірі 10 % від загальної суми прямих витрат. Вихідні дані наведено у табл. 1., розрахунки експлуатаційних витрат – у табл. 2.

Як видно з даних табл. 1, відпускна ціна 1 т товарного коксу сухого гасіння фракції +25 мм у 1,02 рази більша за ціну коксу мокрого гасіння, а сума капітальних вкладень у будівництво УСГК (з урахуванням турбогенератора) у 14,7 разів більша за будівництво комплексу мокрого гасіння. При використанні технології сухого гасіння втрати коксу в камері УСГК (згідно ТЛЗ) складають 0,5 % від загальної їх кількості. Причому, розподіл втрат за фракційним складом коксу наступний:

– металургійний кокс 3,3 %;
– коксовий горішок 2,3 %;

– коксовий дрібняк 94,4 %.

Таблиця 1

Вихідні дані

Найменування показника	Значення показника за технологією гасіння коксу	
	сухе	мокре
Об'єм переробки шихти, тис.т	1013,1	1013,1
Виробництво валового коксу 6 % вологості, тис.т	800,0	804,0
Вихід сухого валового коксу з сухої шихти, %	74,23	74,60
Виробництво сухого валового коксу, тис.т	752,0	755,8
Вихід коксу по фракціях, %:		
+ 25 мм	91,3	90,9
10 - 25 мм	3,6	3,6
0 - 10 мм	5,1	5,5
Виробництво сухого коксу по фракціях, тис.т:		
+ 25 мм	686,9	687,0
10 - 25 мм	27,1	27,2
0 - 10 мм	38,0	41,6
Міцність металургійного коксу, %:		
M ₂₅	88,0	87,0
M ₁₀	7,1	7,6
Відхилення* відпускної ціни 1 т товарного коксу фракції +25 мм, % (+/-):	+1,86**	
Відхилення* суми капітальних вкладень, % (+/-)	+93,2	
Виробництво електроенергії турбіною, кВт·год	48135000	-
Споживання електроенергії на власні потреби, кВт·год	16050000	-
Кількість пари низького тиску на виході з турбіни, тис. Гкал	159,5	-
Споживання пари на власні потреби, тис. Гкал	16,9	-
Чисельність основних виробничих робітників, осіб	25	4

*- наведено різницю у значенні показника за технологією сухого гасіння коксу (при порівнянні впровадження технологій сухого й мокрого гасіння коксу);

** - відпускна ціна 1 т металургійного коксу при сухому гасінні коксу визначається з урахуванням надбавок до ціни за якість (при збільшенні міцності коксу за показником M₂₅ на 1 % надбавка до ціни становить 0,6 %, при зниженні показника M₁₀ на 1 % надбавка до ціни – 2,6 %).

Таблиця 2

Результати розрахунків експлуатаційних витрат

Найменування показника	Відхилення* показника на 1 т коксу за технологією сухого гасіння коксу, % (+/-)
Сума енергетичних витрат	+97,74
Оплата праці виробничих робітників	+84,07
Відрахування на соціальні заходи (22 %)	+84,04
Витрати на ремонт і утримання основних засобів (3,5 %)	+93,24
Сума амортизаційних відрахувань (10 %)	+93,23
Інші витрати (6 %)	+94,28

* - до суми енергетичних витрат (на 1 т коксу) входять витрати на стиснене повітря (5 м³), воду хімічищену (0,458 м³), азот (12 м³) / електроенергія (0,6 кВт·год), вода на догашення (0,6 м³), відповідно за технологією сухого / мокрого гасіння коксу.

Додаткове витримування коксу в форкамері УСТГ і механічна обробка його в камері гасіння призводять до упорядкування структури коксу та її зміцнення. З урахуванням впливу цих факторів дохід від реалізації товарного коксу при сухому гасінні на 1,5 % більше.

Покращення характеристик міцності коксу сухого гасіння дозволить знизити його витрату на одну тону чавуну в доменному виробництві на 3,5 %.

У цілому, при визначенні та порівнянні ефективності технологій сухого і мокрого гасіння коксу слід також враховувати переваги сухого гасіння з майбутньої економії за рахунок:

- збільшення доходу від реалізації товарного коксу;
- зниження витрат коксу у доменному виробництві;
- реалізації 32085000 кВт·год товарних ресурсів електроенергії власного виробництва,
- реалізації 142 600 Гкал/рік додаткових ресурсів пари низького тиску власного виробництва, яка подава-

тиметься до заводських теплових мереж та дасть можливість знизити споживання теплової енергії (що виробляється у теплосиловому цеху підприємства) і дозволить зекономити 23529 т/рік умовного палива (для потреб хімічних цехів);

– реалізації додаткової кількості товарного коксового газу.

Як видно з даних табл. 2, на 1 т коксу експлуатаційні витрати більші у 17,5 разів за технологією сухого гасіння, порівняно з мокрим. Причому енергетичні витрати більші у 44,2 рази, оплата праці виробничих робітників і відрахування на соціальні заходи більші у 6,3 разів, витрати на ремонт і утримання основних засобів та сума амортизаційних відрахувань більші у 14,8 разів, інші витрати більші у 17,5 разів.

Результат розрахунків економічної ефективності будівництва комплексу об'єктів сухого гасіння коксу за T_0 і P наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Результат розрахунків показників економічної ефективності будівництва комплексу об'єктів сухого гасіння коксу

Найменування показника	Величина показника
Термін окупності капітальних вкладень, рік	3,0
Річна рентабельність, %	32,8

Як видно з даних табл. 3, розрахунками показано економічну ефективність будівництва комплексу об'єктів сухого гасіння коксу: термін окупності менше за період реалізації проекту на 17 років (життєвий цикл УСТГ дорівнює життєвому циклу коксових печей і за проектом складає 20 років), а розрахунковий рівень рентабельності вище на 14,8 % за нормативний.

Завдяки ефективним технічним рішенням, отримані технічні здобутки вдалося успішно впровадити при розробці науково-технічної документації для одного українського і трьох закордонних замовників і плануються до впровадження на інших коксохімічних виробництвах України і за кордоном.

Бібліографічний список

1. **Борецька Н.П.** Оцінка ефективності інноваційної діяльності промислових підприємств / **Н.П. Борецька, І.Ю. Якимчук** // Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія Економічні науки. – 2017. – № 26 (Ч. 2). – с. 32-35 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ej.kherson.ua/journal/economic_26/2/9.pdf.
2. **Федорусь Ю.В.** Підвищення ефективності промислових підприємств переробної галузі України / **Ю.В. Федорусь** // Ефективна економіка – 2014. – № 12 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3933>.

3. **Наказ** Міністерства природи України від 30.05.2014 № 184 «Про внесення змін до Технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин від коксових печей» / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0662-14#Text>.

4. **Розпорядження** КМУ від 30.07.2021 № 868-р «Про схвалення Оновленого національно визначеного внеску України до Паризької угоди» 35 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/868-2021-%D1%80#Text>.

5. **Довідник коксохіміка** / Під заг. ред. **В.І. Рудики, Ю.Є. Зінгермана**. – Т. 2. – Харків: ВД «ІНЖЕК», 2014. – 728 с.

6. **Шевчук А.М.** Основні методи оцінки ефективності інвестиційних проектів на підприємствах у сучасних умовах господарювання / **А.М. Шевчук** / Стратегія і механізми регулювання промислового розвитку: Зб. наук. пр. – Донецьк: ІЕП НАНУ, 2009. – С. 354-365.

7. **Савицька О.М.** Ефективність діяльності та управління підприємством: особливості використання теорії, методології та результативності аналітичних досліджень / **О.М. Савицька, В.О. Салабай** // Ефективна економіка. – 2019. – № 6 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/6_2019/57.pdf.

Рукопис надійшов до редакції 05.06.2023

DEFINITION OF DRY COKE COOLING TECHNOLOGY EFFICIENCY

© **S.A. Kravchenko**, PhD in Technical Sciences, **A.O. Tsymbal**, **S.V. Chaplianko**, PhD in Technical Sciences, **C.V. Sukhorukova** (STATE ENTERPRISE "STATE INSTITUTE FOR DESIGNING ENTERPRISES OF COKE OVEN AND BY-PRODUCT PLANTS" (SE "GIPROKOKS"), 60 Sumska str., Kharkiv, 61002, Ukraine)

As a part of the development of scientific and technical documentation for the reconstruction of coke battery facilities at one of the largest coke production enterprises for metallurgy and one of the largest exporters of chemical products in Ukraine, an analysis of the economic efficiency of implementing dry coke cooling technology was performed. The main issues that required resolution through reconstruction were: improving coke quality, increasing coke production efficiency and reducing harmful emissions into the environment. The project includes the implementation of SE "GIPROKOKS" new technical solutions for improving the technological units of the coke dry cooling plant (CDCP) and dust collection units (with two-stage dry purification), aimed at increasing the CDCP efficiency and reducing environmental emissions, as well as measures to improve working conditions and safety for the operation personnel.

It has been shown that the total capital investment in the CDCP construction (including the turbo generator) is 14,7 times higher than the wet quenching complex construction.

It has been established that with dry coke cooling technology, operating costs per ton of coke are 17,5 times higher compared to wet quenching technology.

In determining the CDCP economic efficiency, the advantages of dry cooling were taken into account, including: increased revenue from the sale of commercial coke, reduced coke consumption in blast furnace production, utilization of self-produced electrical energy resources, additional low-pressure steam resources from self-production, and additional quantities of commercial coke oven gas. The economic efficiency of implementing dry coke cooling technology has been proven: the non-discount pay-back period is less than the project implementation period by 17 years (the CDCP life cycle is equal to the coke ovens life cycle and is projected to be 20 years), and the calculated level of simple annual internal rate of return on investment is higher by 14,8 % compared to the normative level.

Due to effective technical solutions, the obtained technical achievements have been successfully implemented in the development of scientific and technical documentation for one Ukrainian and three international clients.

Keywords: capital investment, pay-back period, simple rate of return, coke oven and by-product production, reconstruction, coke oven battery, coke cooling, coke dry cooling plant.

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

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА ІЗОЛЯЦІЙНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД КОРОЗІЇ НАФТО- ТА ГАЗОПРОВІДІВ

© **А.Я. Гаїнов**¹, **А.Б. Григоров**²

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

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

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

В статті надано результати теоретичних та експериментальних досліджень щодо розробки енергоефективної технології виробництва нових ізоляційних вуглеводневих матеріалів (ІВМ), які знайдуть застосування у якості покриттів для захисту від корозійного руйнування газо- та нафтопроводів. Визначено, що використання вторинної сировини є саме тим раціональним шляхом, який дозволить знизити витрати при виробництві ІВМ та одночасно з цим, покращити екологічну ситуацію в країні. Показано, що перспективною вторинною сировиною для виробництва ІВМ слід вважати відпрацьовані нафтопродукти, продукти коксохімічного виробництва, відходи поліетилентерефталату (ПЕТ), смолисто-асфальтенові речовини, відпрацьовані полімерні вироби, відпрацьовані автомобільні шини, вторинну целюлозу, рідкі продукти піролізу полімерної та гумової сировини. Ключовими моментами у виробництві ІВМ, які дозволять отримувати кінцевий продукт з прогнозованим рівнем експлуатаційних властивостей, визначено підбір сировини, її підготовку до переробки та варіювання технологічних параметрів власне під час переробки (модифікування вуглеводневої основи модифікаторами та активуючими речовинами). В межах цього підходу сформульовано основні вимоги до вторинної сировини, які дозволяють виробляти ІВМ без надмірного навантаження на обладнання нафтопереробних підприємств. Представлено графічну інтерпретацію формування захисних властивостей ІВМ та принципову схему виробництва ІВМ на базі вторинної сировини, застосування якої забезпечує отримання ІВМ з досить широкими температурними межами їх використання ($-30 \div +120$ °C) та іншими показниками якості, що відповідають вимогам до сучасних ізоляційних матеріалів.

Ключові слова: корозія, руйнування, ізоляційні вуглеводневі матеріали, вторинна сировина, відпрацьовані нафтопродукти, нафтовий шлам, кислий гудрон, смолисто-асфальтенові речовини, кам'яновугільний пек, полімери, гума крихта.

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

Захист від корозійного руйнування металевих конструкцій, комунікацій та промислового обладнання, зокрема газо- та нафтопроводів, належить до числа найактуальніших завдань сьогодення. Корозійне руйнування можна охарактеризувати як руйнування сплавів внаслідок їхньої хімічної або електрохімічної взаємодії з навколишнім середовищем, що супроводжується виникненням різних дефектів – тріщин, каверн (порожнин), виразок (піттингова корозія), тощо. В остаточному підсумку, корозійне руйнування металевої поверхні газо- та нафтопроводів може призвести до виникнення аварійних ситуацій внаслідок їх розгерметизації.

Одним з ефективних методів боротьби з корозійним руйнуванням газо- та нафтопроводів є нанесення на їх поверхню ізоляційних вуглеводневих матеріалів (ІВМ), які утворюють на металевій поверхні суцільний шар захисного покриття [1, 2]. Цей метод, хоча і відноситься до пасивних методів захисту, але, внаслідок простоти своєї реалізації, відносно низької вартості та високого рівня захисту від корозії, є досить поширеним у промисловості.

В умовах раціонального використання енергоресурсів та покращення світової екологічної ситуації досить перспективним напрямком у розвитку сучасної промисловості вважається залучення до різних технологічних процесів, вторинної сировини, що представлена відходами виробництва та споживання [3, 4]. Вторинна сировина досить часто представлена матеріалами, які володіють досить високим потенціалом позитивних властивостей, що можна використати у виробництві нових матеріалів, зокрема ІВМ. Спираючись на базові принципи керування якістю на виробництві [5, 6], зазначимо, що раціональний підбір з числа вторинної сировини основних компонентів для виробництва ІВМ дозволить отримувати кінцевий продукт з високим рівнем захисних властивостей без додаткового введення присадок, що, в остаточному підсумку, буде суттєво знижувати собівартість його виробництва.

Всі сучасні ІВМ можна представити як суміш вуглеводневої основи (ВО), модифікатора (М) цієї основи та активуючих речовин (АР). В якості ВО з числа вторинної сировини перспективними можна вважати відпрацьовані нафтопродукти (наприклад, змащувальні матеріали – рідкі оливи та пластичні мастила), нафтові шлами, кислі гудрони, некондиційні нафтопродукти (наприклад, мазути, гудрони, бітуми, змащувальні оливи, пластичні мастила) та продукти коксохімічного виробництва (наприклад, кам'яно-вугільний пек). Модифікаторами зазначеної ВО можуть виступати вторинні полімери і целюлоза, гума крихта, отримана з відпрацьованих автомобільних шин, різні розчинники – вуглеводневі фракції, зокрема із високим вмістом ароматичних речовин. Стосовно АР слід зауважити, що їх додавання до складу ІВМ не обов'язково, а використовується в тих випадках, коли М разом з поліпшенням одних властивостей ВО погіршує інші. Тоді для запобігання цьому погіршенню в склад ІВМ додають АР.

Окрім підбору сировини формувати захисні властивості ІВМ можна варіюючи технологічні параметри (наприклад, температуру, тривалість процесу, ступень подрібнення, обробку хімічними реагентами, промивку) [7] на стадії підготовки ВО і М власне процесу модифікування вуглеводневої основи та шляхом додавання активуючих речовин [8, 9]. Кожен з зазначених факторів вносить дуже значний вклад у формування захисних властивостей та може розглядатися лише в сукупності з іншими. Зважаючи на це, графічна інтерпретація формування захисних властивостей ІВМ може бути представлена схемою, що наведена на рис. 1.

Будь-яку схему виробництва ІВМ для захисту металевої поверхні газо- та нафтопроводів від корозії на базі вторинної сировини можна надати у вигляді блок-схеми, що наведена на рис. 2. Ця схема є універсальною та може бути реалізована з використанням будь-якого виду вторинної сировини.

Підготовка ВО виступає ключовим процесом у виробництві ІВМ. Її основною метою є очищення компонентів від небажаних домішок та створення умов до їх енергоефективної переробки.

Розглянуті вище різновиди ВО є собою сумішами, переробка котрих в натуральному вигляді призведе до псування основного технологічного обладнання. Окрім цього, небажані домішки, що присутні у ВО при її переробці, переходять до кінцевого продукту, значно

погіршуючи його властивості (наприклад, однорідність, адгезійні властивості, тощо). Підготовка таких ВО, як відпрацьовані та некондиційні нафтопродукти та нафтові шлами, полягає в їх послідовному нагріванні (до 70-100 °С), обробці хімічними реагентами (наприклад, демульгаторами) та відстоюванні або центрифугуванні. Результатом цієї переробки є очищена ВО, придатна для виробництва ІВМ без створення ризиків виникнення аварійних ситуацій. Підготовка кислого гудрону є дещо складнішим процесом у порівнянні з підготовкою інших ОВ. Так, в наслідок вмісту в кислому гудроні значної кількості сірчаної кислоти (іноді до 70 %) [10], його підготовка, головним чином, полягає в нейтралізації цієї кислоти хімічними реагентами: водними розчинами лугів (NaOH, KOH) або органічними амінами ($[-C_2H_4NH-]_n$, $C_4H_{11}NO_2$) [11].

Останнім етапом в підготовці кислих гудронів до переробки є видалення з них надлишкового вмісту води. На підставі проведених численних лабораторних та промислових досліджень в галузі переробки різних видів промислових відходів, нами було сформульовано загальні вимоги до підготовленої ВО, що представлені в табл. 1.

Сформульовані в табл. 1 вимоги дозволяють переробляти ВО без надмірного навантаження на обладнання нафтопереробних підприємств, що, у свою чергу, сприяє суттєвому подовженню строку його експлуатації.



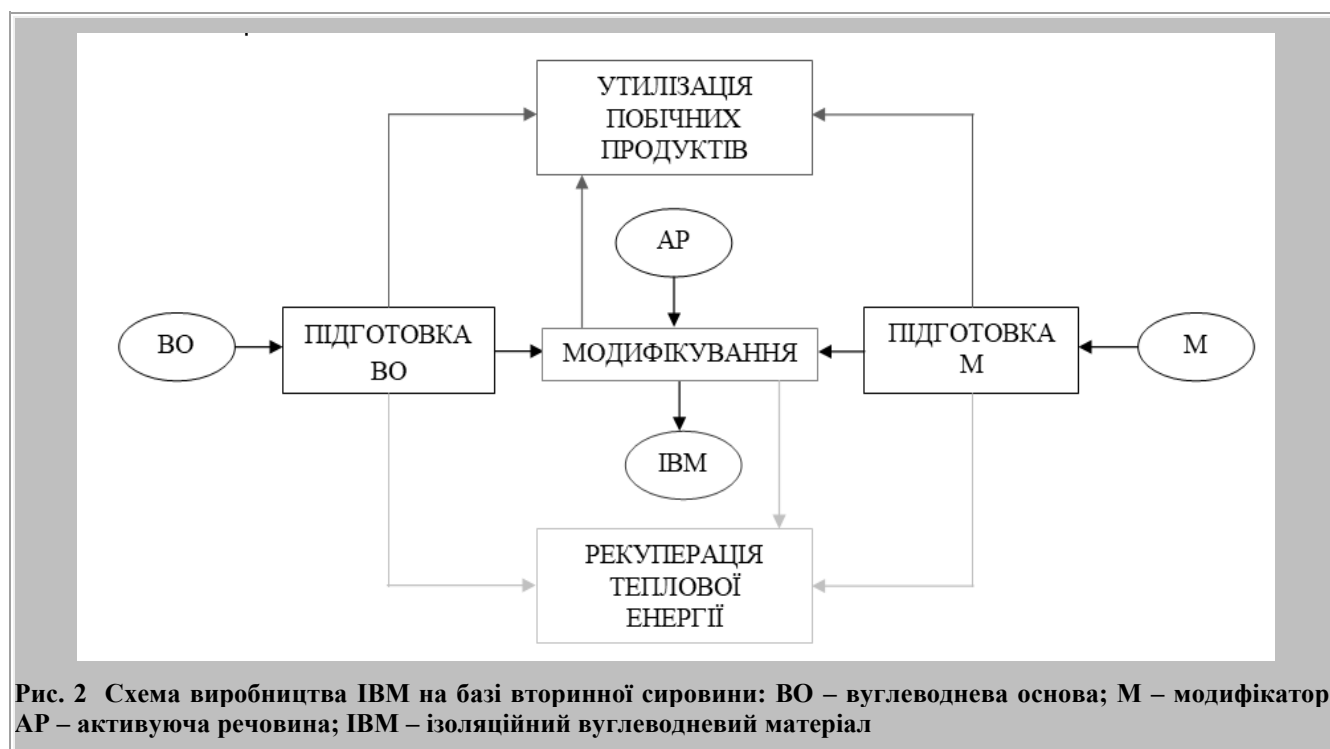


Рис. 2 Схема виробництва ІВМ на базі вторинної сировини: ВО – вуглеводнева основа; М – модифікатор; АР – активуюча речовина; ІВМ – ізоляційний вуглеводневий матеріал

Таблиця 1

Загальні вимоги до підготовленої ВО

Найменування показника	Одиниці виміру	Числове значення
Вміст води	% мас.	0,20-0,60
Вміст механічних домішок	% мас.	0,15-0,55
Вміст летких вуглеводнів (межа википання до 120 °С), не більше	% мас.	3
Наявність водорозчинних кислот та лугів	-	Відсутність
Кінематична в'язкість при 100 °С, не більше	мм ² /с	90
Корозійна дія на метал (сталь), не більше	Бали	1b
Небезпечність, не вище	Клас	III-IV

Підготовка М не менше важливий процес, ніж підготовка ВО. В залежності від фазового стану М його підготовка складається з різних, послідовних та взаємопов'язаних стадій. Так, при підготовці полімерних модифікаторів, що представлені твердими поліолефінами (поліетиленами, поліпропіленом, полістиролом) основними технологічними етапами виступають сорту-

вання за видами, промивка, просушка та подрібнення [12]. Для М у вигляді відпрацьованих автомобільних шин цей процес додатково містить стадію вилучення із гумової крихти металевого кордуну [13]. Загальні вимоги до підготовлених твердих М для ВО, представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Загальні вимоги до твердих М для ВО

Найменування показника	Одиниці виміру	Числове значення
Вологість, не більше	% мас.	0,5
Розмір часточок, діаметр не більше	мм	4
Термічна стійкість, не менше	°С	250
Небезпечність, не вище	Клас	III-IV

В випадку коли застосовують рідкі модифікатори – нафтові розчинники, рідкі продукти піролізу полімерної та гумової сировини, то їх підготовка може полягати в видаленні води, механічних домішок та фракціюванні (обмеження температур початку та кінця кипіння фракцій).

Модифікування ВО зазвичай протікає при підвищених температурах (150-250 °С) при постійному перемішуванні реакційної суміші. Для перемішування можна використовувати різні типи гомогенізаторів або механічні перемішувачі пристрої (мішалки якорного або турбінного типу) зі швидкістю обертання до 1000 об./хв. У випадку твердих модифікаторів можна говорити про їх термодиспергацію в ВО. Ця диспергація супроводжується набуханням та частковим або повним розчиненням М в об'ємі ВО. В результаті цього процесу між ВО та М виникає фізична або фізико-хімічна взаємодія (сорбція, хемосорбція, утворення водневих зв'язків), що надає ВО бажаних позитивних властивостей. Також слід зазначити, що модифікація поліетилентерефталату (PET) та смолисто-асфальтенових речовин полягає в їх контрольованому термічному розчиненні у рідких модифікаторах (температура розчинення для PET – 270-320 °С, для смолисто-асфальтенових речовин, в залежності від обраного розчинника – 60-250 °С). Модифікування таких високомолекулярних речовин розчинниками спрощує процедуру їх нанесення на металеву поверхню газо- та нафтопроводів. Під час процесу модифікування ВО в реакційну суміш також іноді додають активуючі речовини, які підвищують ефективність процесу модифікування за рахунок зменшення тривалості процесу та утворення міцної структури кінцевого продукту – ІВМ.

Утилізація побічних продуктів є невід'ємною складовою будь-якої технологічної схеми виробництва та є необхідним заходом, спрямованим на збереження довкілля і здоров'я людини [14]. Утилізація побічних продуктів виробництва поруч із комплексним використанням ВО – найважливіші напрями зниження матеріаломісткості технологічних схем виробництва. Заходи щодо утилізації побічних продуктів розробляються на стадії проектування та є визначальними при отриманні дозвільної документації на запуск в експлуатацію технологічної схеми виробництва.

При виробництві ІВМ утворюються наступні побічні продукти: стічні води; вуглеводневі викиди; механічні домішки. Джерелами утворення стічних вод та механічних домішок є процеси підготовки ВО та М; вуглеводневих викидів – безпосередньо процес модифікування ВО.

Зазвичай, вода подається на біохімічну очистку з подальшим її надходженням до технологічного процесу виробництва (створення замкнутого циклу води), а саме до стадії підготовки ВО та М. Іноді вода після очищення надходить до заводської каналізації. Механічні домішки використовують при проведенні будівельних робіт на виробництві або утилізують шляхом поховання в котлованах, з подальшою рекультивацією ґрунтів. Вуглеводневі викиди утворюються як при порушенні технологічного процесу (наприклад, проливи ВО), так і при процесі модифікації, в наслідок випаровування легких вуглеводневих фракцій з ВО та М. Проливи утилізують згідно існуючих норм та правил, а легкі вуглеводневі викиди (C₂-C₄), кількість котрих може сягати 5-10 % від маси сировини, збираються в загальну газозбиральну систему, звідки подаються на пальники з метою отримання теплової енергії для технологічного процесу виробництва ІВМ.

Рекуперація теплової енергії є головним чинником в забезпеченні енергоефективності виробництва, що впливає і на собівартість виробництва в цілому [15]. В зазначеній схемі, тепла енергія використовується при реалізації процесів підготовки ВО та М, а особливо під час модифікації ВО. Тому, дуже важливим є збереження підведеної теплової енергії для подальшого використання як в схемі виробництва ІВМ, так і в інших суміжних технологічних процесах. Наприклад, надлишкове тепло, яке утворюється при модифікації ВО, раціонально використовувати для розігріву ВО та М в процесах їх підготовки.

Таким чином, реалізувавши схему виробництва ІВМ на базі вторинної сировини, що представлена на рис. 2, можна отримати продукт з показниками якості, наведеними в табл. 3.

Слід зазначити, що значення показників якості ІВМ, представлені в табл. 3, будуть варіюватися в залежності від обраних компонентів, їх вмісту у суміші, послідовності введення їх у суміш та від технологічних параметрів як підготовки ВО і М, так і власне процесу модифікування.

Таблиця 3

Показники якості отриманих ІВМ

Найменування показника	Одиниці виміру	Значення показника
Колір	-	Від світло коричневий до чорний
Зовнішній вигляд	-	Однорідна в'язка або тверда маса
Температура розм'якшення за методом «Кільця та шару»	°С	75-150
Наявність водорозчинних кислот та лугів	-	Відсутність
Корозійний вплив на метали (сталь)	Клас	1а-1б
Стійкість покриття з ІВМ до статичній дії води при 20 °С, не менше:	Год.	720
Захисні властивості (Сталь 3) при статичній дії речовин при 20 °С, протягом 720 год.: - 10 % водного розчину NaCl; - 3 % водного розчину Na ₂ SO ₃ .	-	Витримує
Температурні межі використання	°С	-30 ÷ +120
Пенетрація при 25°С	мм×10-1	10-40
Адгезійні властивості	Н/мм ²	0,12-0,65
Еластичність	%	35-60
Водонасичення за 24 години	%	0,02-0,50

Висновки

1. В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень було представлено графічну інтерпретацію формування захисних властивостей ІВМ та загальну принципову схему виробництва ІВМ на базі вторинної сировини. Визначено перелік найбільш перспективної вторинної сировини, яку доцільно використовувати при виробництві ІВМ.

2. Сформульовано основні вимоги до ВО (вміст води $\leq 0,5$ % мас.; вміст механічних домішок $\leq 0,15$ % мас.; вміст легких вуглеводнів (межа википання до 120 °С) ≤ 2 % мас.; відсутність водорозчинних кислот та лугів; кінематична в'язкість при 100 °С ≤ 60 мм²/с; корозійна дія на метал (сталь) не більше 1б; клас небезпечності не вище III-IV) та М (вологість $\leq 0,5$ % мас.; розмір часточок, діаметр ≤ 2 мм; термічна стійкість ≥ 250 °С; клас небезпечності не вище III-IV), які дозволяють виробляти ІВМ без надмірного навантаження на обладнання нафтопереробних підприємств, що, у свою чергу, сприяє суттєвому подовженню терміну його експлуатації та зниженню виробничих витрат за рахунок зменшення аварійних ситуацій на виробництві та пов'язаних з ними ремонтів обладнання.

3. Рациональний підбір вторинної сировини відповідно до позитивного потенціалу її властивостей та

варіювання параметрів її технологічної переробки в ІВМ дозволяє отримувати продукт з досить широкими температурними межами використання (-30 ÷ +120 °С) та іншими показниками якості, що знаходяться на рівні або перевищують вимоги до ізоляційних матеріалів, які сьогодні досить широко використовуються у промисловості.

Бібліографічний список

1. **Онищенко В.О.** Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів транспортування нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах: Монографія / **В.О. Онищенко, В.О. Онищенко, Ю.Л. Винников, М.Л. Зоценко, С.Ф. Пічугін, М.О. Харченко, О.В. Степова, В.М. Савик, П.О. Молчанов, П.Ю. Винников, О.М. Ганошенко.** – Полтава: ФОП Пусан А.Ф., 2018. – 258 с.
2. **Сусак О.М.** Трубопровідний транспорт газу / **О.М. Сусак, В.К. Касперович, М.П. Андрійшин.** – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2013. – 345 с.
3. **Міщенко В.С.** Шляхи підвищення потенціалу використання вторинних ресурсів / **В.С. Міщенко, Ю.М. Маковецька** // *Продуктивні сили України.* – 2009. – № 1. – С. 29-43.

4. **Богінська Л.О.** Використання відходів виробництва у будівництві / **Л.О. Богінська** // Нові технології в будівництві. – 2021. – № 39. – С. 35-42.
5. **Сирохман І.В.** Управління якістю / **І.В. Сирохман, Т.М. Лозова, О.Я. Давидович, М.-М. В. Калимон.** – Львів: Растр-7, 2015. – 427 с.
6. **Томащук І.В.** Управління якістю продукції на підприємстві в умовах входження України в ЄС / **І.В. Томащук** // Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики. – 2022. – № 2. – С. 123-141.
7. **Xiaolong Gao.** Technological Innovation, Product Quality and Upgrading of Manufacturing Value Chain: Empirical Evidence from China / **Xiaolong Gao, Changfei Li, Ehsan Elahi, Muhammad Ilyas Abro** // Sustainability. – 2023. – 15 (9). – 7289. <https://doi.org/10.3390/su15097289>.
8. **Abraham A. Abe.** Biomaterials and Their Potentialities as Additives in Bitumen Technology: A Review / **Abraham A. Abe, Cesare Oliviero Rossi, Paolino Caputo** // Molecules. – 2022. – 27(24). – 8826. <https://doi.org/10.3390/molecules27248826>.
9. **Ainur Zhambolova.** Mechanochemically Activated Shungite as an Additive to Improve Bitumen Characteristics / **Ainur Zhambolova, Yerdos Ongarbayev, Aliya Kenzhegaliyeva, Dinmukhamed Abdikhan** // Journal of Ecological Engineering. – 2023. – 24(11). – P. 218-226. <https://doi.org/10.12911/22998993/171563>.
10. **Sunday A. Leonard.** Characterization of acid tars / **Sunday A. Leonard, Julia A. Stegemann, Amitava Roy** // Journal of Hazardous Materials. – 2010. – 175(1-3). – P. 382-392. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.015>.
11. **НaoХи.** Acid Tar Lagoons: Assessment and Environmental Interaction. Department of Civil and Structural Engineering. University of Sheffield, 2007 : 222 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://etheses.whiterose.ac.uk/12858/>.
12. **Angélica F.M. Streit.** Development of a pre-treatment process of polymeric wastes (HDPE, LDPE/LLDPE, PP) for application in the qualification of selectors of recyclable materials / **Angélica F.M. Streit, Marianna P. de Santana, Daliomar Lourenço de Oliveira Júnior, Mariana M. Bassaco** // Environment Development and Sustainability. – 2022. – 24(5). – P. 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01705-5>.
13. **Muhammad Haikal Sitepu.** Used tires recycle management and processing: a review / **Muhammad Haikal Sitepu, Armayani, Abdul Rahim Matondang, Meilita Tryana Sembiring** // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. – 2020. – 801. – 012116. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/801/1/012116>.
14. **Verónica C Garcia.** Waste Minimization in the Chemical Industry: From Theory to Practice / **Verónica C Garcia, Eva Pongrácz, Riitta Keiski** // Waste Minimization and Resources Use Optimization Conference. 2004:12. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/228807373_Waste_Minimization_in_the_Chemical_Industry_From_Theory_to_Practice.
15. **Chen W.** Sustainable energy recovery from thermal processes: a review / **Chen, W., Huang, Z. & Chua, K.J.** // Energy, Sustainability and Society. – 12. – № 46 (2022). <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00372-2>.

Рукопис надійшов до редакції 25.08.2024

DOI: 10.31081/1681-309X-2024-0-6-41-48

Specialty 161. U.D.C.: 628.483

TECHNOLOGICAL BASIS OF PRODUCTION OF INSULATING HYDROCARBON MATERIALS FOR CORROSION PROTECTION OF OIL- AND GASPIPELINES

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

The article presents the results of theoretical and experimental research on the development of an energy-efficient technology for the production of new insulating hydrocarbon materials (IHM), which will be used as coatings for protection against corrosive destruction of gas and oil pipelines. It was determined that the use of secondary raw materials is the most rational way that will allow to reduce costs in the production of IHM and, at the same time, to improve the ecological situation in the country. Spent petroleum products, non-standard coke chemical production products, polyethylene terephthalate (PET) waste, tar-asphaltic substances, spent polymer products, spent automobile tires, secondary cellulose, liquid products of pyrolysis of polymer and rubber raw materials should be considered quite promising secondary raw materials for the production of IHM. The key points in the production of IHM, which will allow obtaining a final product with a predicted level of operational properties, are the



definition and selection of raw materials, the preparation of raw materials for processing and the variation of technological parameters during processing itself (modification of the hydrocarbon base with modifiers and activating substances). Within this approach, the main requirements for secondary raw materials are formulated, which allow to produce IHM without excessive load on oil refinery equipment. A graphic interpretation of the formation of the protective properties of IHM and a scheme for the production of IHM based on secondary raw materials are presented, using which it is possible to obtain IHM with fairly wide temperature limits of its use ($-30 \div +120$ °C) and other quality indicators that meet the requirements for modern insulating materials.

Keywords: corrosive destruction, insulating hydrocarbon materials, secondary raw materials, spent petroleum products, oil sludge, sour tar, tar-asphaltic substances, coal pitch, polymers, rubber crumb.

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



Вуглекімічний 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. 5,59. Умовн. друк. арк. 5,58. Наклад 150 прим. Зам. № 24-83.

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