



ISSN 1681-309X

ВуглеХімічний журнал



КХВ ПАТ «АрселорМіттал

Кривий Ріг» - 90 років

4 2026

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.



Спеціальності G1 (Хімічні технології та інженерія), E3 (Хімія)
Кластер «Хімія, хімічні технології та фармація»

Вуглехімічний журнал індексується в міжнародній наукометричній базі
Index Copernicus

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор: с.н.с., к.т.н. О.Л. Борисенко (м. Харків).

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

Члени редколегії: ст. досл., д.т.н. Л.П. Банніков, (м. Харків), проф., д.т.н. О.Б. Гринишин (м. Львів), ст. досл., Ph.D. В.В. Коваль, відп. секретар (м. Харків), проф., д.т.н. Д.В. Мірошніченко (м. Харків), проф., д.т.н. Ю. Озолінс (м. Рига, Латвія), проф., д.т.н. В.О. Панасенко (м. Харків), проф., д.т.н. С.В. Пиш'єв (м. Львів), д.х.н. Є.О. Посохов (м. Харків), доц., к.х.н., Т.І. Червінський (м. Львів), проф., д.х.н. Т.Г. Шендрік (м. Київ), ст. досл., Ph.D. А. Шишкін (м. Рига, Латвія), доц., к.т.н. І.В. Шульга (м. Харків)

ЕКСПЕРТНА ГРУПА

проф., д.т.н. В.М. Гуляєв, 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

90 років КХВ. Націлені на Перемогу**Шановні колеги-коксохіміки, партнери, дорогі друзі!**

2 серпня для коксохіміків ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» є особливим днем. Це офіційний день народження нашого підприємства, день, коли було підписано акт приймання заводу в роботу, і цього річчя дата є ювілейною – уже минуло 90 років із дня заснування!

Це не просто день, а видатна та значуща подія, яка символізує тривалий життєвий шлях, сповнений різноманітними подіями, викликами та перемогами.

Бути націленими саме на перемоги, ніколи не здаватися коксохіміків навчило життя, довга та непроста біографія підприємства.

Завод було збудовано та введено в експлуатацію в 30-х роках минулого століття – у час важких випробувань для українського народу, виснаженого роками війн, епідемій і голоду. Але, незважаючи на всі труднощі, коксохіміки, націлені на перемогу, морозним січневим днем видали перші тонни криворізького коксу.

Ці вольові риси характеру, притаманні нащадкам козаків, що колись перемагали ворогів у рідних криворізьких степах, допомагали і допомагають коксохімікам протягом усієї історії рідного виробництва: і під час відновлення після руйнівної Другої світової війни, і під час непростих 90-х років, і під час становлення незалежної України, і під час повномасштабного вторгнення Росії. Разом із підприємством змінювалися не лише епохи, а й одночасно розвивалися, еволюціонували наука й техніка, технології.



Будівництво коксохімічного заводу планувалося у Кривому Розі паралельно з металургійним заводом «Криворіжсталь», адже основним споживачем коксу були й залишаються доменні печі, а металурги завжди стояли з коксохіміками пліч-о-пліч.

Сьогодні коксохімічне виробництво є частиною великого гірничо-металургійного підприємства України – ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», що входить до складу міжнародної корпорації «ArcelorMittal». Воно

має в своєму складі 4 діючі коксові батареї, які щорічно виробляють понад 2 млн т коксу валового 6 %-ої вологості. Окрім того, завод випускає побічну хімічну продукцію, котру постачає як на внутрішній ринок, так і на експорт: бензол сирий кам'яновугільний, смолу кам'яновугільну, амонію сульфат коксохімічного виробництва, смолу важку з кислотої смолки уловлювання для шляхового будівництва, полімери бензольних відділень тощо.



За 90-річну історію коксохімічне виробництво випустило: 248,6 млн. т валового коксу, більше 10,5 млн. т смоли кам'яновугільної, 1,764 млн. т бензолу сирого кам'яновугільного, 2,757 млн. т сульфату амонію.

Із входженням ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» до складу міжнародної корпорації «ArcelorMittal» на коксохімічному виробництві, як і на всьому гірничо-металургійному підприємстві загалом, протягом двох десятиріч відбувалася активна технічна модернізація із впровадженням сучасних прогресивних технологій, досягнень науки й техніки.

Так, було виконано чимало капітальних і поточних ремонтів, модернізовано майже всі основні об'єкти заводу, закуплено нове сучасне устаткування, що відповідає світовим стандартам у галузях технології, охорони праці та екології. Підприємство системно оновлює виробничі потужності, розширює асортимент та постійно підвищує якість своєї продукції, успішно реалізує проекти з енергозбереження.

Беззаперечно, найбільш значущою подією останніх років в історії коксохімічного виробництва стало будівництво протягом 2013-2018 рр. коксових батарей № 5, 6, на яких упроваджено нову технологію – трамбування вугільної шихти, головною перевагою якої є використання більш дешевої і доступної сировини – слабкоспікливого вугілля. Використання нової технології дозволило не лише поліпшити якість готової продукції, але й також підвищити гарячу міцність коксу при використанні високолеткого газового вугілля або слабкоспікли-

вого вугілля з гіршими якісними показниками, ніж при використанні гравітаційного методу завантаження шихти в камери коксування.

Масштабне будівництво коксових батарей № 5, 6 дозволило не лише оновити виробничі потужності виробництва, адже побудовано нові коксові агрегати фактично «з нуля», а й модернізувати основні виробничі фонди, зокрема природоохоронного призначення. Було також закуплено нові комплекти коксових машин, замінено багато чинних і прокладено багато нових енергетичних комунікацій. Використання сучасних технологій під час будівництва дозволило суттєво поліпшити умови праці та безпеку робочих місць.

Успішна реалізація проекту будівництва коксових батарей № 5, 6 має значний екологічний ефект, дозволивши знизити обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Новітні технології, націлені на зменшення викидів пилу й газів, були впроваджені на всіх етапах виробництва коксу – від завантаження шихти й процесу коксування до видавання готової продукції. Під час будівництва комплексу було встановлено систему екомоніторингу за викидами від димових труб коксових батарей № 5-6 та установки безпиллової видачі коксу на кб № 5-6.

На сьогодні коксові батареї № 5, 6, безсумнівно, являють собою сучасний промисловий об'єкт, на якому встановлено передове в галузі коксохімії устаткування та реалізовано економічно обґрунтовані рішення й тех-

нології, що відповідають найвищим стандартам охорони праці, промислової та екологічної безпеки.



І це стало ще однією великою перемогою для кожного коксохіміка, адже в кожному проектному рішенні, у кожній закладеній цеглині, у кожній тонні виданого коксу – результат праці великої кількості людей, що в будні та свята будували не покладаючи рук своє дітище.

Страшний для всіх українців лютий 2022 року коксохімічне виробництво зустріло із шістьма діючими коксовими батареями, що виробляли на той час більше ніж 8000 т коксу валового на добу. Це був ще один виклик, перевірка на мужність, згуртованість, єдність, і коксохіміки з честю склали й цей іспит.



Аби зберегти пічний фонд та забезпечити безпечну експлуатацію устаткування, безпеку персоналу, в найкоротші терміни було прийнято рішення вивести на «гарячу консервацію» коксові батареї № 3, 4, а згодом і коксові батареї № 5, 6. Більше ніж півроку виробництво коксу брали на себе коксові батареї № 1, 2, що працювали на потребу підприємства на той час близько 40 років (коксіві батареї № 1-2 було побудовано і введено в 1974-1975 р., а в 1991 вони були зупинені на частко-

вий ремонт кладки і в подальшому поетапно введено в експлуатацію в 1996, 1999 роках)

«Гаряча консервація» стала значним викликом для коксових батарей, але команда коксового цеху № 1 успішно впоралася із цим непростим завданням. Співробітники систематично контролювали технічний стан коксових батарей, ретельно стежили за дотриманням температурних і гідравлічних режимів, забезпечуючи стабільну роботу устаткування.



Спочатку коксові батареї, як зазвичай у процесі роботи, підігрівали за допомогою коксового газу, але в умовах «гарячої консервації» його виявилось недостатньо. Тоді на допомогу криворізьким колегам прийшли польські колеги з корпорації «ArcelorMittal»: установку, яка підготовлювала для обігріву батарей суміш природного газу з азотом на заміну коксовому газу оператив-но привезли з Польщі.

Як тільки в жовтні 2022 року після вимушеної зупинки через повномасштабне вторгнення коксові батареї № 5, 6 було виведено з режиму «гарячої консервації», у тому ж місяці керівництво підприємства прийняло рішення щодо повної зупинки, виведення з експлуатації коксових батарей № 1, 2 як фізично застарілих. Це рішення дозволило поліпшити стан довкілля в місті.

Виведення з експлуатації коксових батарей № 1, 2 – це результат поетапної реалізації інвестиційної програми підприємства, яка передбачає будівництво нових сучасних агрегатів та модернізацію наявних.



Але в 2024 році на нас чекали інші випробування – блекаути. І ще раз довелося коксохімікам переводити коксову батарею № 5 на «гарячу консервацію», адже в результаті пожежі, спричиненої раптовим зникненням світла в енергосистемі, що не витримала підступних ворожих ударів, сильно було пошкоджено власне коксову батарею № 5 та коксові машини, що обслуговували на цей момент виробничий процес. Але коксохіміки перегорнули й цю неприємну сторінку в своїй біографії: відновлювальний ремонт, що вівся не однією парою рук, за рік дозволив коксовій батареї № 5 знову «задихати» на повні груди.



Війна важким катком пройшлася не лише по країні та людях, а й безпосередньо по українському бізнесу: вітчизняні гіганти металопродукції вимушено скоротили виробництво майже на 70 % порівняно з довоєнним. Політична нестабільність, висока вартість електроенергії, заблокована логістика, дефіцит кадрів, на жаль, уповільнює розвиток підприємства.

Але попри ці вкрай складні часи для країни коксохімічне виробництво в складі ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» продовжує стабільно працювати, підтримуючи економіку України й рідного міста.

Наразі коксохімічне виробництво зосередило свою основну увагу на підтримувальних та відновлювальних ремонтах діючого устаткування, але ця, здавалося б, буденна та монотонна робота потребує теж чимало уваги та зосередженості, а також – це можливість уважним оком глянути на знайоме устаткування й децю його змінити, модернізувати, а інколи й відмовитися від застарілого на шляху до повного оновлення виробничих потужностей.



Так, протягом останніх років було виконано чимало різних ремонтів: налагодження пальників гаража розморожування у вуглепідготовчому цеху; відновлення працездатності приладів системи екомоніторингу на димових трубах та УБВК коксових батарей № 5, 6, а також ремонт ГОУ коксортувальні в коксовому цеху № 1; ремонт абсорбера, дистиляційної і регенераційної колон, а також ремонт устаткування сірчаних скрубєрів й устаткування установки WSA в цеху вловлювання та сіркоочищення; ремонт котла пікової парокотельні, флотатора та градирень в енергетичному цеху тощо.



На постійній основі виконуються ремонти, що стосуються камер коксування (заміна й ремонт дверей, газопідвідної/газовідвідної арматури) та кладки коксових печей (часткове перекладання, ремонт кладки методом керамічного наплавлення або методом мокрого торкретування). Це не просто підтримувальні та відновлювальні роботи, це насамперед діяльність природоохоронного спрямування, покликана зменшити негативний вплив на довкілля, працівників та жителів міста.



Нові реалії життя диктують нові умови виробництва: наприклад, через зниження обсягів виробництва в поточному році заплановано модернізацію сірчаноокислотного відділення цеху вловлювання та сіркоочищення, а ще коксохіміки освоюють новий вид продукції – виробництво ливарного коксу.



І все це виклики, що дозволяють коксохімікам стати лише сильнішими та загартованішими, ніби міцна арселорівська сталь, яку вони допомагають «варити» колегам-металургам.

Наші маленькі й великі успіхи та перемоги – це результат щоденних зусиль кожного працівника, а запорука гарних результатів – в єдності, згуртованості та дружності нашого колективу, де люди працюють на

виробництві, відстоюють країну зі зброєю в руках на передовій і завжди готові підтримати один одного.



Облікова чисельність працівників складає близько 900 осіб, майже 23 % співробітників наразі мобілізовані до лав Збройних сил України, 18 працівників віддали своє життя за свободу та мир в Україні. З початком військової агресії ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» активно допомагає українським військовим, наближаючи таку жадану перемогу України, а також спрямовує кошти на соціальні проекти та благодійну допомогу. Адже немає чужої біди, разом – ми стаємо сильнішими, а перемогти можна, лише підтримуючи один одного. Попри всі виклики сьогодення, всі наші співробітники не втрачають ані відповідальності, ані працьовитості, ані оптимізму та віри в щасливе та мирне майбуття. Ми наполегливо продовжуємо працювати й створювати, навчатися й упроваджувати, виробляти й удосконалювати, досягаючи успіху разом, цілеспрямовано та впевнено.

Адже 90 років – це не просто цифра, це втілення знань, досвіду й мудрості п'ятьох поколінь відданих своїх справі людей. Коксохімічне виробництво пишеться своїми трудовими династіями, ветеранами виробництва та простими звичайними працівниками, які присвятили десятки років трудового життя рідному підприємству і для яких коксохімічне виробництво завжди було не просто підприємством, а й великою родиною.

Ветерани коксохімічного виробництва – це особливі люди, які зробили неоціненно великий внесок у розвиток нашого підприємства, це ті, хто своєю відданою працею заклали міцний фундамент сучасної коксохімії, нашої промислової домівки, це ті, чий традиції сумлінної та чесної праці, щирої незмінної любові до обраної справи й досі живуть і передаються з покоління в покоління. Спадкоємність поколінь є важливою складовою збереження найкращих традицій коксохімічної та металургійної спільноти, адже багаторічний, набутий десятиріччями досвід, переданим молодому поколінню,

дав свої «плоди»: молоді фахівці так само згуртовано, стійко, мужньо й самовіддано, як їх попередники-наставники, працюють, підтримуючи економіку України, захищають рідну землю, рідні домівки, рідний завод.

Наші працівники – це і є запорука успіху рідного підприємства, адже це люди, чия щоденна професійна старанність, багаторічна відданість своїй справі, незмінна любов до рідного заводу та рідного міста, незламна внутрішня сила – це цеглинка у фундамент нашої спільної Перемоги: Перемоги України, Перемоги над злом і темрявою, Перемоги над труднощами. Ми віримо, що після неї наше підприємство, наш спільний дім, стане сильнішим і потужнішим, сучаснішим і модернізованішим.

Щиро вдячний кожному працівнику коксохімічного виробництва та ветеранам за вашу невтомну й нелегку працю!

Бажаю нашому колективу завжди бути націленим на Перемогу, незважаючи на будь-які труднощі й перепони, бажаю гідно пережити «темні часи», вистояти, залишитися світлими людьми. Мирного неба над вашими оселями, міцного здоров'я вам і вашим найріднішим людям та подальших років процвітання нашому спільному коксохімічному «дому».

Микола ГАЛУШКІН,
директор з коксохімічного
виробництва та енергетики
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»



ВуглеХімічний журнал

4

Науково-виробничий
журнал

Виходить шість номерів
на рік

Заснований у вересні
1993 р

З А С Н О В Н И К И:

Українська науково-
промислова
асоціація
«УКРКОКС»

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

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

При передруці матеріалів
посилання на журнал
обов'язкове.

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

Ціна договірною.

Зміст

стор.

- Мукіна Н.В., Коваль В.В., Мірошніченко Д.В.** Оптимізація складу вугільних шихт та режимів коксування КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» в умовах зміни сировинної бази та воєнного стану в Україні 9
- Галушкін М.В., Колупайко А.О., Ситник О.В., Борисенко О.Л., Шульга І.В.** Оптимізація технології трамбування шихти та режимів обігріву камер коксування на КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» 26
- Кузнецов В.О., Каренов Р.В., Солонько С.М., Гасвський Ю.І., Банніков Л.П.** Промисловий досвід введення в експлуатацію трубчастої печі для високоефективного нагрівання поглинальної оливи 37
- Черногоров О.В., Красніков Д.В., Дорошенко К.О., Банніков А.Л.** Аналіз конструктивних рішень сірчаних скрубєрів у процесах очищення коксового газу 43
- Мартінова А.Ю., Зеленьська Н.М., Солонько О.П.** Роль центральної лабораторії у системі аналітичного контролю, стандартизації та забезпечення якості продукції 48

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-4-1-56

© ДП «УХІН», «Вуглехімічний журнал», 2026
ISSN 1681-309X



Journal of Coal Chemistry

4

Contents

page.

Bimonthly scientific and
technical journal
Founded in 1993

FOUNDERS:

Ukrainian Scientific-
Industrial
Association
«UKRKOKS»

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

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

Mention of the source when
reprinting papers is
obligatory.

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

The price is subject to agree-
ment.

- Mukina N.V., Koval V.V., Miroshnychenko D.V.** Optimization of coal blend composition and coking conditions at the coke plant of PJSC “ARCELORMITTAL KRYVYI RIH” under conditions of raw material base changes and martial law in Ukraine 9
- Galushkin M.V., Kolupayko A.O., Sytnik O.V., Borysenko O.L., Shulga I.V.** Optimisation of the coal blend tamping process and heating regimes for coking chambers at the coking plant of PJSC ‘ARSEALORMITTAL KRYVYI RIH’ 26
- Kuznecov V.O., Karenov R.V., Solonko S.M., Gaevskiy Yu.I., Bannikov L.P.** Industrial experience in starting up a tubular furnace for high-efficiency heating of absorbent oil 37
- Chernogorov V.O., Krasnikov D.V., Doroshenko K.O., Bannikov A.L.** Analysis of the design solutions for sulfur scrubbers in coke oven gas treatment processes 43
- Martynova A.Yu., Zelenska N. M., Martynova A.Yu., Zelenska N.M.** The role of the central laboratory in the system of analytical control, standardization and quality assurance 48

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-4-1-56

© SE «UKHIN», Journal of Coal Chemistry, 2026
ISSN 1681-309X

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ВУГІЛЬНИХ ШИХТ ТА РЕЖИМІВ КОКСУВАННЯ КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» В УМОВАХ ЗМІНИ СИРОВИННОЇ БАЗИ ТА ВОЄННОГО СТАНУ В УКРАЇНІ© Н.В. Мукіна¹*Коксохімічне виробництво ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", 50095, Дніпропетровська обл., м. Кривий Ріг, вул. Криворіжсталі, 1, Україна***В.В. Коваль²***ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)», 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна***Д.В. Мірошніченко³***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна*¹ Мукіна Наталія Володимирівна, Ph.D. (техн. науки), нач. технічного відділу, ORCID: 0009-0007-0774-4124, Scopus ID: 57485403500, e-mail: Natalia.Mukina@arcelormittal.com² Коваль Валентин Валерійович, Ph.D. (техн. науки), старший дослідник, ст. наук. співр. вугільного відділу, ORCID: 0000-0003-3771-3293, Scopus ID: 57211492224, e-mail: kovalen79@gmail.com³ Мірошніченко Денис Вікторович, докт. техн. наук, проф., зав. кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, ORCID: 0000-0001-6830-8747, Scopus ID: 6602479663, e-mail: dvmir79@gmail.com

Коксохімічне виробництво в умовах зміни структури постачання коксівного вугілля потребує розроблення раціональних складів шихт, здатних забезпечити стабільне отримання металургійного коксу необхідної якості. Метою роботи було визначення впливу складу вугільних шихт та параметрів їх підготовки на технологічні властивості шихти, процес трамбування, якість коксу та вихід побічних продуктів коксування для умов КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

У статті наведено результати дослідження впливу складу вугільних шихт та параметрів їх підготовки на ефективність процесу коксування і якість отриманого металургійного коксу для умов КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Роботу виконано з урахуванням сучасних виробничих викликів, пов'язаних зі зміною сировинної бази, обмеженням доступності високоякісного коксівного вугілля та необхідністю забезпечення стабільної роботи підприємства в умовах воєнного стану в Україні.

Досліджено реальні вугільні концентрати різного марочного складу та встановлено закономірності впливу їх петрографічних, технологічних і гранулометричних характеристик на процес формування трамбованої шихти та властивості коксу. Встановлено, що збільшення частки газового вугілля низької стадії метаморфізму супроводжується зниженням виходу коксу, погіршенням його механічних характеристик та зростанням реакційної здатності. Показано, що застосування трамбованих шихт забезпечує підвищення щільності завантаження та формування коксу з покращеними показниками CRI/CSR. Найкраще співвідношення властивостей коксу та технологічних характеристик шихти отримано для другого варіанта складу, для якого значення CRI становили 30,0–32,7 %, а CSR близько 60 %.

Доведено, що оптимізація складу шихти дозволяє ефективніше використовувати доступну вугільну сировину без суттєвого погіршення якості металургійного коксу. Отримані результати можуть бути використані для вибору складу виробничих шихт та підготовки промислових випробувань у коксохімічному виробництві.

Встановлено вплив ступеня подрібнення вугільної шихти на енерговитрати процесу трамбування та формування щільності вугільного пирога. Отримані результати узгоджуються з сучасними підходами до оптимізації підготовки трамбованих шихт та підтверджують необхідність комплексного врахування якості вугілля і технологічних параметрів його підготовки.

Практичне значення роботи полягає у визначенні раціонального складу вугільної шихти для умов КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», що дозволяє забезпечити стабільне виробництво металургійного

коксу при зміні джерел постачання сировини. Результати досліджень можуть бути використані для подальшого удосконалення технології підготовки шихт, зокрема із застосуванням сучасних технологічних добавок та методів регулювання спіковості вугільних сумішей.

Ключові слова: вугільна шихта; коксування; металургійний кокс; КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; трамбування шихти; сировинна база; якість коксу; петрографічний склад; гранулометричний склад; воєнний стан.

Автор для листування Н.В. Мукіна, e-mail: Natalia.Mukina@arcelormittal.com

Рукопис надійшов до редакції 21.04.2026

Прийнято до публікації 01.07.2026

Опубліковано 22.07.2026

Ця стаття ліцензується відповідно до міжнародної ліцензії CC BY 4.0

1. Вступ

Коксохімічне виробництво є однією з ключових складових металургійного комплексу України, оскільки якість доменного коксу значною мірою визначає ефективність та стабільність роботи доменних печей. Формування необхідних властивостей коксу є результатом комплексного впливу якості вихідної вугільної сировини, складу шихти, параметрів її підготовки та технологічних режимів коксування [1].



ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є одним із найбільших підприємств гірничо-металургійного комплексу України з повним виробничим циклом. Історія підприємства налічує понад 80 років розвитку: від отримання першої плавки сталі у 1939 році та формування у післявоєнний період потужного металургійного виробництва до створення сучасного інтегрованого комплексу, до складу якого увійшло коксохімічне виробництво у 1997 році. Після входження підприємства до міжнародної корпорації «АрселорМіттал» у 2005–2007 роках розпочався новий етап технологічного розвитку, пов'язаний із реалізацією масштабних інвестиційних та модернізаційних проєктів.

Важливим етапом розвитку коксохімічного виробництва стало введення в експлуатацію коксових батарей №5 та №6 із технологією трамбування вугільної шихти. Використання цієї технології розширило можливості формування виробничих шихт різного складу, підвищило ефективність використання вугільної сировини та забезпечило відповідність виробництва сучасним вимогам до якості металургійного коксу.

Технологія підготовки трамбованих вугільних шихт потребує особливо ретельного контролю властивостей окремих компонентів та оптимізації їх співвідношення. Відомо, що петрографічний склад, ступінь метаморфізму, вміст мацералів, гранулометричний склад та умови підготовки шихти визначають процеси формування пластичного шару під час коксування і, відповідно, структуру та властивості готового коксу [2, 3].

Особливого значення ці питання набули в останні роки внаслідок суттєвої зміни умов функціонування металургійної галузі України [4]. Після початку повномасштабної агресії росії проти України у 2022 році ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», як і інші підприємства галузі, зіткнулося з необхідністю швидкої адаптації виробничих процесів до нових умов. Серед основних викликів були порушення традиційних логістичних маршрутів, зміна структури постачання коксівного вугілля, обмеження доступності окремих марок високоякісної сировини та необхідність забезпечення стабільної якості продукції при використанні зміненого складу шихт.

Водночас у сучасних умовах воєнного стану, обмеженого постачання вугілля та нестабільності світового ринку спостерігається дефіцит коксівного вугілля високої якості, ціна якого більш ніж на 50 % перевищує вартість слабкоспікливих марок [5]. Це зумовлює необхідність пошуку альтернативних джерел сировини та оптимізації складу вугільних шихт без погіршення якості коксу.

У цих умовах особливо актуальним стало наукове обґрунтування вибору складу вугільних сумішей та режимів їх підготовки. Дослідження впливу якості вугілля, співвідношення компонентів шихти та параметрів трамбування на формування властивостей коксу дозволяють визначити раціональні технологічні рішення для промислового виробництва [6].

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності використання обмеженої сировинної бази є застосування технологічних методів регулювання властивостей вугільних шихт, зокрема використання спеціальних добавок, здатних впливати на процеси спікання та формування коксової структури без погіршення характеристик продуктів коксування [7].

Новизна роботи полягає у встановленні закономірностей впливу зміни марочного складу вугільної шихти для умов КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та способу її підготовки на комплекс технологічних властивостей шихт, структурно-механічні характеристики коксу, показники CRI/CSR та формування виходу побічних продуктів коксування, який забезпечує стабільне отримання металургійного коксу при використанні обмеженої сировинної бази.

Метою даної роботи є визначення оптимального складу вугільної шихти та параметрів її підготовки для

забезпечення стабільного виробництва металургійного коксу в умовах КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» при зміні сировинної бази та роботі підприємства в умовах воєнного стану в Україні.

2. Характеристика вихідної сировини та методи досліджень

Для оцінювання можливості оптимізації складу вугільних шихт в умовах зміни сировинної бази КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» проведено комплексне дослідження вугільних концентратів, які використовуються або можуть бути використані при формуванні виробничих шихт для коксування. Дослідження спрямовані на визначення впливу основних характеристик вугільної сировини, а саме: ступеня метаморфізму, петрографічного складу, технологічних властивостей та гранулометричного складу, на процес підготовки шихти, умови формування трамбованого вугільного пирога та якість отриманого металургійного коксу.

Вихідними матеріалами для досліджень були концентрати коксівного та газового вугілля різного походження, які характеризуються відмінностями за марочним складом, ступенем метаморфізму та технологічними властивостями.

Відбір проб вугільних концентратів здійснювали відповідно до вимог ДСТУ 4096–2002 «Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань». Дослідження виконували за комплексом стандартизованих методів відповідно до вимог ДСТУ 7724:2015 «Вугілля кам'яне для коксування. Технічні вимоги», що включали визначення показників технічного аналізу, петрографічного складу, пластометричних характеристик, спікливості та коксівності. Підготовку лабораторних проб до аналізу виконували за стандартними методами дослідження вугілля для коксування.

2.1. Характеристика досліджених вугільних концентратів

Для проведення досліджень використовували 13 вугільних концентратів різного марочного складу, які застосовуються або можуть бути використані як компоненти коксівних шихт у виробничих умовах КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». До дослідження включено концентрати українського, американського, польського, чеського та австралійського походження, що характеризуються широким діапазоном показників метаморфізму, петрографічного складу, пластичності в'язких властивостей та здатності до подрібнення.

Вибір такого набору компонентів обумовлений необхідністю оцінювання можливості формування оптимальних складів вугільних шихт в умовах зміни традиційної сировинної бази, обмеження доступності окремих марок високоякісного коксівного вугілля та необхідності адаптації технології коксування до сучасних виробничих умов. Основні характеристики досліджених концентратів за показниками технічного аналізу,

петрографічного складу та основними технологічними властивостями наведено у табл. 1.

За результатами аналізу встановлено, що досліджені концентрати охоплюють широкий діапазон ступеня метаморфізму. Значення середнього показника відбиття вітриніту R_0 змінюються від 0,87 % для окремих зразків

жирного вугілля до 1,32 % для високоякісного коксівного вугілля марки K(K2). Вміст летких речовин V^{daf} змінюється від 21,4 до 35,7 %, що визначає різну газоутворювальну здатність компонентів та їх роль у формуванні структури коксу.

Таблиця 1

Технологічні властивості дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Технічний аналіз, %				Пластометричні показники, мм		Вміст вітриніту	Вміст інертиніту	Середній довільний показник відбиття вітриніту, %	Тиск розпирання, * кПа	
		W^a	A^d	S_t^d	V^{daf}	X	Y	V_t	I	R_0	P_n	P_{10}
ЗФ «Добропільська», Україна	ГЖП	1,1	8,5	1,45	35,7	48	11	80	18	0,88	2,4	0,8
Marfork, США	Ж	1,4	8,4	0,94	34,8	38	21	81	17	0,87	3,8	1,4
Ramsey, США	Ж	0,9	6,7	0,87	32,9	33	17	78	20	0,96	5,3	3,3
Welmor, США	Ж	0,8	11,5	1,14	33,2	36	21	79	18	0,99	5,8	3,2
Virginia Crews, США	Ж	0,6	8,6	0,67	27,8	26	21	60	38	1,12	Нема даних	
Borunia, Польща	K(K1)	0,6	5,2	0,56	25,1	24	13	72	26	1,18	9,8	5,7
Pniowek, Польща	K(K1)	0,7	6,9	0,63	26,8	30	13	79	19	1,06	6,1	2,7
CSM, Чехія	K (K1)	1,1	9,9	0,53	23,2	28	17	60	38	1,31	11,6	6,0
EVL Premium, США	K (K1)	1,2	10,4	0,42	26,1	28	15	69	30	1,05	4,3	1,6
GLV Nail Creek, Австралія	K(K2)	1,0	10,0	0,36	22,7	35	14	56	42	1,26	9,4	6,1
Lake Vermont, Австралія	K(K2)	1,2	7,4	0,42	23,5	39	13	59	38	1,20	7,2	5,0
Oliva Downs, Австралія	K(K2)	1,6	10,0	0,40	21,4	27	13	63	35	1,32	Нема даних	
Venture, Австралія	Не маркується	0,6	9,4	0,31	25,3	33	10	60	39	1,15	5,3	2,8

* Дослідження P_n проводили при гравітаційному завантаженні зразка; P_{10} – після вільного розширення трамбованого пирога на 10 мм.

Петрографічний склад дослідженого вугілля характеризується переважанням вітриніту, вміст якого становить 56–81 %. Частка інертиніту змінюється у межах 17–42 %, що визначає відмінності у реакційній здатності компонентів та впливає на формування міцності коксу після коксування.

Особливу увагу приділяли оцінюванню пластично-в'язких властивостей вугілля, оскільки саме вони визначають здатність компонентів до взаємодії у пластичному шарі та формування міцної коксової структури. Для цього визначали товщину пластичного шару у, індекс спікання за Рога, тип коксу за Грей-Кінгом, по-

казники дилатації та характеристики плинності за методом Гізелера.

Характеристика пластично-в'язких властивостей досліджених концентратів наведена у табл. 2

Встановлено, що досліджені концентрати суттєво відрізняються за рівнем спікливості. Індекс спікання за Рога змінюється від 25 од. для вугілля Venture до 78 од. для окремих жирних вуглів США. Коксівне вугілля марок K(K1) і K(K2) характеризується нижчими значеннями пластичності порівняно з жирним вугіллям, але забезпечує необхідний структурний внесок при формуванні коксової матриці [8]. Максимальне розширення (дилатацію), що фіксується методом Одібера-

Арну ($b=171\%$), найменшу початкову температуру розм'якшення – $382\text{ }^{\circ}\text{C}$, найбільше значення інтервалу пластичності ($\Delta t=99\text{ }^{\circ}\text{C}$) має вугілля Ramsey (марка «Ж»). Втім, максимальну плинність пластичної маси, що утворюється ($F=5709$ поділів шкали в хвилину) має вугілля Marfork. В цілому найвищими показниками пластичності характеризується жирне вугілля (3 з них – Marfork, Ramsey та Virginia Crews доволі близькими, в

той час як Welmore – дещо нижчими). Низькі показники має вугілля ЗФ «Добропільська» (марка «ГЖП»), та коксівне вугілля Pniowek, GLV Nail Creek, Lake Vermont, Venture та Oliva Downs. Останні 4 згадані вугільні концентрати характеризуються наявністю великої кількості мацералів групи інертиніту ($37\text{--}42\%$), що не спікаються в органічній масі аналізованого вугілля.

Таблиця 2

Характеристика пластично-в'язких властивостей дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Індекс спікання за методом Рога, од.	Тип коксу за Грей-Кінгом	Індекс вільного спучування, од.	Дилатація за Одібером-Арну					Показники плинності за Гізелером				
		RI	GK	FSI	$t_1, ^{\circ}\text{C}$	$t_{II}, ^{\circ}\text{C}$	$t_{III}, ^{\circ}\text{C}$	a, %	b, %	$F_{\max}, \text{dd/min}$	$t_1, ^{\circ}\text{C}$	$t_{\max}, ^{\circ}\text{C}$	$t_3, ^{\circ}\text{C}$	$\Delta t, ^{\circ}\text{C}$
ЗФ «Добропільська», Україна	ГЖП	41	D	3 ½	393	444	-	28	т. ст	3	412	433	464	51
Marfork, США	Ж	78	>G8	6 ½	367	424	479	24	146	5709	391	442	481	90
Ramsey, США	Ж	77	G4	6 ½	365	421	485	26	171	4201	382	442	481	99
Welmore, США	Ж	78	>G8	6	361	425	471	26	100	2243	402	441	480	78
Virginia Crews, США	Ж	75	G8	7 ½	380	427	483	27	123	3990	397	454	496	99
Borynia, Польща	K(K1)	60	G	8	399	447	480	29	54	28	422	461	494	72
Pniowek, Польща	K(K1)	45	G	4 ½	404	465	472	25	- 23	9	425	455	479	54
CSM, Чехія	K (K1)	60	G3	7	408	446	477	23	50	135	412	457	493	81
EVL Premium, США	K (K1)	49	G1	5 ½	399	452	478	20	23	41	418	457	487	69
GLV Nail Creek, Австралія	K(K2)	45	G	6 ½	411	465	-	20	т. ст	4	433	463	484	51
Lake Vermont, Австралія	K(K2)	47	F	6 ½	414	460	484	21	- 9	11	428	452	488	60
Oliva Downs, Австралія	K(K2)	52	F	3 ½	424	463	-	20	т. сж	7	434	470	491	57
Venture, Австралія	Не маркується	25	B	3 ½	404	460	-	20	т. ст	2	430	454	481	51

Представлені у табл. 1 характеристики дозволяють оцінити придатність окремих компонентів для формування коксівних шихт та визначити можливість їх взаємозаміни при зміні структури сировинної бази.

2.2. Гранулометричні характеристики та подрібнюваність вугілля

Оскільки ефективність підготовки вугільної шихти значною мірою визначається гранулометричним складом компонентів, додатково досліджували розподіл частинок за крупністю та середній діаметр частинок.

Гранулометричний склад досліджених концентратів характеризувався значними відмінностями. Частка класу <3 мм змінювалася від 34,6 % для українського концентрату ГЖП до 86,9 % для польського концентрату Pniowek. Такі відмінності пов'язані як із властивостями

вихідного матеріалу, так і з особливостями його попередньої підготовки.

Для визначення коефіцієнта розмолотості застосовували метод Хардгроу (HGI). За величиною цього показника вугілля умовно поділяють на три групи: 1 – міцне, при $HGI < 50$ од.; 2 – середньоподрібнюване, при $HGI = 50\text{--}65$ од.; 3 – легкоподрібнюване, при $HGI = 65\text{--}100$ од. Отримані значення HGI для досліджених концентратів знаходилися в межах 45–87 од. Найнижчу розмолотість мав концентрат ГЖП ЗФ «Добропільська» ($HGI = 45$ од.), тоді як для більшості концентратів марок K(K1) та K(K2) характерні підвищені значення показника (72–87 од.).

Для окремих марок коксівного вугілля високі значення HGI пояснюються значною часткою дрібних класів у вихідному матеріалі. Зокрема, для концентрату

Ворунія частка класу <3 мм становила 70,3 %, а для Pniowek – 86,9 %.

Залежність коефіцієнта розмолоздатності від ступеня помелу наведено на рис. 1.

Встановлено тісний взаємозв'язок між коефіцієнтом розмолоздатності та ступенем помелу вугілля. Коефіцієнт кореляції цієї залежності становить 78,8 %, що сві-

дчить про значний вплив властивостей окремих компонентів на формування гранулометричного складу підготовленої шихти.

Гранулометричний склад, основні характеристики подрібнення досліджених концентратів та коефіцієнти їх розмолоздатності наведено у табл. 3.

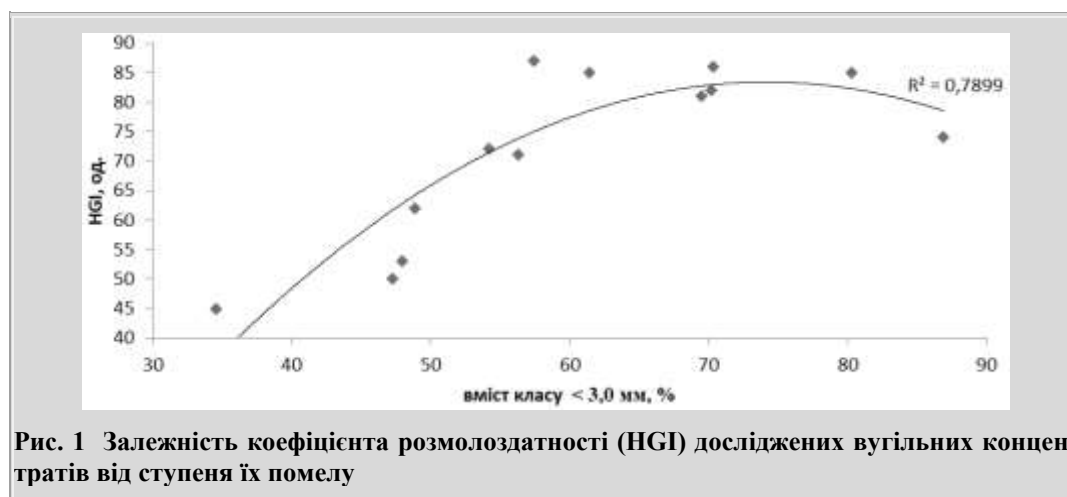


Рис. 1 Залежність коефіцієнта розмолоздатності (HGI) досліджених вугільних концентратів від ступеня їх помелу

Таблиця 3

Гранулометричний склад дослідженого вугілля

Постачальник, країна	Марка	Гранулометричний склад (мм), %									Середній діаметр частинок, мм	Коефіцієнт розмолоздатності за Хардгро-вим, од.
		>50	25-50	13-25	6-13	3-6	1-3	0,5-1	<0,5	<3	d ₅	
ЗФ «Добропільська», Україна	ГЖП	0,5	9,5	18,0	22,5	14,9	12,5	5,6	16,5	34,6	10,50	45
Marfork, США	Ж	0,0	8,0	12,2	18,1	14,4	16,1	7,5	23,7	47,3	8,12	50
Ramsey, США	Ж	1,0	5,0	10,8	17,5	17,7	17,8	8,3	21,9	48,0	7,61	53
Welmore, США	Ж	0,0	2,2	8,7	20,4	19,8	18,6	7,3	23,0	48,9	5,79	62
Virginia Crews, США	Ж	0,0	2,9	8,0	15,3	17,5	22,7	11,0	22,6	56,3	5,44	71
Borynia, Польща	К(К1)	0,0	0,7	6,0	10,1	12,9	22,5	14,6	33,2	70,3	3,59	86
Pniowek, Польща	К(К1)	0,0	0,2	3,9	3,3	5,7	15,4	16,2	55,3	86,9	1,95	74
CSM, Чехія	К (К1)	0,0	6,3	11,4	15,4	12,7	16,2	10,2	27,8	54,2	7,83	72
EVL Premium, США	К (К1)	0,0	6,2	7,6	12,8	12,0	13,7	7,9	39,8	61,4	5,96	85
GLV Hail Creek, Австралія	К(К2)	0,0	5,0	9,5	5,9	9,4	22,4	13,8	34,0	70,2	5,30	82
Lake Vermont, Австралія	К(К2)	0,0	4,5	10,4	14,0	13,7	21,6	10,6	25,2	57,4	6,18	87
Oliva Downs, Австралія	К(К2)	0,0	2,1	5,0	10,3	13,1	24,6	13,5	31,4	69,5	3,98	81
Venture, Австралія	Не маркується	0,0	4,0	4,0	4,1	7,6	16,9	12,6	50,8	80,3	3,55	85

Отримані результати мають важливе технологічне значення, оскільки гранулометричний склад шихти визначає не тільки умови її підготовки, але й ефективність формування трамбованого вугільного пирога. Зокрема, зміна частки дрібних класів може впливати на щільність завантаження, енерговитрати процесу трамбування та умови формування структури коксу.

2.3. Формування дослідних варіантів вугільних шихт

Для оцінювання впливу складу шихти та характеристик окремих компонентів на процес трамбування і якість отриманого коксу формували декілька варіантів вугільних сумішей із різним співвідношенням компонентів. При формуванні складів шихт враховували марочний склад компонентів, ступінь метаморфізму, петрографічний склад, пластично-в'язкі властивості, гранулометричні характеристики, здатність компонентів до подрібнення.

Підготовку вугільних компонентів здійснювали шляхом подрібнення до заданого гранулометричного

складу з подальшим формуванням однорідних шихт. Дослідження включали наступні основні етапи:

- визначення характеристик вихідних вугільних концентратів;
- формування варіантів шихт;
- визначення параметрів трамбування;
- лабораторне коксування;
- оцінювання показників якості отриманого коксу.

Базовий варіант відповідав фактичному складу виробничої шихти КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» і використовувався як вихідний для порівняння. Другий варіант передбачав заміну окремого газового компонента шихти альтернативним вугіллям з метою оцінювання можливості використання іншої сировини без погіршення технологічних характеристик процесу. Третій та четвертий варіанти передбачали зміну співвідношення окремих жирних і коксівних компонентів із метою визначення можливості оптимізації рецептури при обмеженій доступності окремих марок високоякісного коксівного вугілля. Варіанти вугільних шихт, марочні та компонентні склади яких наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Марочний і компонентний склади вугільних шихт для лабораторного коксування

Постачальник	Марка	Марочний склад шихти, %							
		Гравітаційне завантаження (3-4 к/б)				Трамбоване завантаження (6 к/б)			
		Варіант 1 (баз.)	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 1 (баз.)	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
ЗФ «Добропільська»	ГЖП	19	0	15	10	41	0	32	30
Semi Soft, Австралія	Г	0	19	0	0	0	41	0	0
Marfork, США	Ж	19	19	0	17	10	10	0	10
Ramsey, США	Ж	3	3	22	0	3	3	13	0
CSM, Чехія	К (К1)	25	25	20	17	14	14	8	5
GLV Nail Creek, Австралія	К(К2)	4	4	8	11	5	5	9	12
Lake Vermont, Австралія	К(К2)	12	12	10	12	13	13	13	8
EVL Premium, США	К (К1)	9	9	11	16	6	6	10	15
Venture, Австралія	Не маркується	9	9	14	17	8	8	15	20
Разом		100	100	100	100	100	100	100	100

Для оцінювання впливу способу підготовки та завантаження шихти лабораторні дослідження проводили для двох варіантів:

- гравітаційного завантаження, що моделює умови роботи коксових батарей №3–4;
- трамбованого завантаження, що відповідає технології коксових батарей №5–6.

Параметри трамбування оцінювали за величиною необхідної роботи ущільнення, щільністю сформованого вугільного пирога та показниками тиску розпирання.

Отримані кокси досліджували за комплексом показників, що характеризують їх технологічну придатність для використання у доменному процесі.

2.4. Методика лабораторного коксування та оцінювання якості коксу

Лабораторне коксування підготовлених варіантів шихт виконували у 5-кг лабораторній печі ДП «УХІН».

Перед проведенням коксування компоненти шихти подрібнювали, дозували та змішували відповідно до

заданого рецепту. Для трамбованого варіанта попередньо формували вугільний піріг із заданою щільністю.

У процесі досліджень контролювали: склад вугільної шихти, гранулометричний склад, спосіб формування завантаження, щільність трамбованої шихти та технологічні параметри коксування.

Після завершення процесу визначали вихід коксу та його якісні характеристики (вихід коксу, механічну міцність, стираність, гранулометричний склад, вихід основних хімічних продуктів коксування, а також реакційну здатність CRI та післяреакційну міцність CSR, визначені відповідно до стандартів ASTM D5341/D5341M та ISO 18894 [9, 10].

Показник реакційної здатності коксу CRI визначали за формулою:

$$CRI = \frac{m_0 - m_1}{m_0}, \quad (1)$$

де m_0 – маса зразка коксу до реакції, г; m_1 – маса зразка після взаємодії з діоксидом вуглецю, г.

Показник післяреакційної міцності CSR визначали за формулою:

$$CSR = \frac{m_2}{m_1} * 100, \quad (2)$$

де m_1 – маса коксу після реакції, г; m_2 – маса фракції коксу після механічного випробування, г.

Таким чином, застосована методика дозволила комплексно оцінити вплив властивостей вихідного вугілля, співвідношення компонентів шихти та параметрів її підготовки на формування якості металургійного коксу. Отримані результати стали основою для визначення раціональних напрямів адаптації сировинної бази КХВ

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в умовах зміни умов постачання та роботи підприємства у період воєнного стану.



3. Результати та обговорення

3.1. Формування властивостей вугільних шихт

Сформовані нами для проведення лабораторних коксувань вугільні шихти в результаті мали характеристики, які представлені в табл. 5 (Технологічні властивості) та табл. 6 (Петрографічна характеристика). Петрографічний склад досліджених шихт визначає співвідношення пластичних і інертних компонентів, що безпосередньо впливає на формування зв'язуючої фази під час карбонізації та подальшу структуру коксу.

Таблиця 5

Технологічні властивості дослідних вугільних шихт

Варіант	Технічний аналіз, %				Пластометричні показники, мм		Індекси основності	Тиск розпирання, кПа	Трамбованість, кПа
	W ^a	A ^d	S ^d _t	V ^{daf}	X	Y	I _b	P _n / P ¹⁰	δ ₃₃
Гравітаційне завантаження (3-4 к/б)									
1	1,7	8,8	0,68	28,4	32	15	2,33	4,3	-
2	1,0	9,3	0,56	29,1	30	15	1,84	4,8	-
3	0,7	8,6	0,66	27,7	30	14	2,00	5,3	-
4	0,7	9,1	0,58	27,0	31	13	2,03	5,7	-
Трамбоване завантаження (6 к/б)									
1	1,1	8,5	0,84	30,4	38	13	2,46	3,4	15,2
2	0,7	9,1	0,56	31,0	35	14	1,80	4,4	17,6
3	1,0	8,3	0,74	28,8	33	13	2,37	3,8	16,4
4	0,8	8,9	0,74	28,9	33	13	2,32	3,2	15,8

Так найвищою є зольність шихт 2-х варіантів, а варіантів 3 завдяки підвищеному вмісту в них вугілля Ramsey із низьким (6,7 %) вмістом золи – найнижчою. Вміст сірки шихт гравітаційного завантаження є в межах 0,56–0,68 %, а трамбованого – 0,56–0,84 % (в обох

випадках шихти 2-го варіанту характеризуються мінімальним вмістом сірки завдяки високому дольовому вмісту в них вугілля Semi Soft); вихід летких речовин 27,0-29,1 % в шихтах гравітаційного завантаження і 28,8-31,0 % – в шихтах трамбованого завантаження;

тиск розпирання – 3,2–5,3 кПа; товщина пластичного шару – 13–15 мм.

На показники реакційної здатності CRI і післяреакційної міцності CSR значною мірою впливає індекс основності I_b [11]. Як видно з табл. 3.2, досліджені шихти не суттєво відрізняються за цим показником. Максимальними значеннями характеризуються шихти з

високим вмістом вугілля 3Ф «Добропільська», варіанту 1 ($I_b=2,33$ і 2,46 відповідно для гравітаційного і трамбованого завантаження), в той час як мінімальними значеннями, завдячуючи заміні вугілля газового 3Ф «Добропільська», на вугілля Semi Soft тієї ж групи, характеризуються шихти 2-х варіантів ($I_b=1,84$ і 1,80 відповідно для гравітаційного і трамбованого завантаження).

Таблиця 6

Петрографічна характеристика вугільних шихт

Варіант	Петрографічний склад (без мінеральних домішок),%					Середній довільний показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту,%						C _ш , %	K _ш
							0,50- 0,79	0,80- 0,89	0,90- 1,19	1,20- 1,49	1,50- 1,69	1,70- 2,59		
							Марки вугілля, умовно відповідні стадіям метаморфізму вітриніту							
	Vt	Sv	I	L	ΣFC	R0	ДГ+Г	ГЖП+ ГЖ	Ж	К	ПС	П		
Гравітаційне завантаження (3-4 к/б)														
1	67	2	29	2	31	1,09	13	14	37	33	3	0	46,90	1,58
2	63	2	32	3	34	1,06	25	7	52	12	4	0	40,32	1,27
3	66	1	31	2	32	1,10	10	9	57	22	2	0	52,14	1,69
4	65	1	32	2	33	1,11	11	8	49	32	0	0	52,65	1,66
Трамбоване завантаження (6 к/б)														
1	70	1	28	1	30	1,03	34	10	33	21	2	0	37,80	1,29
2	65	3	30	2	33	0,94	42	5	32	19	2	0	33,15	1,07
3	67	2	30	1	32	1,04	29	6	36	28	1	0	42,88	1,37
4	67	2	29	2	31	1,05	22	8	36	34	0	0	46,90	1,58

Що стосується петрографічної характеристики (табл. 6), то через нижчий вміст газового вугілля, очікувано шихти гравітаційного завантаження характеризуються вищими значеннями (1,06–1,11 %) середнього довільного показника відбиття вітриніту ніж шихти трамбованого завантаження (0,94–1,05 %). За вмістом вітриніту та фюзенізованих компонентів всі шихти різняться між собою незначною мірою, так вміст вітриніту в них варіюється в інтервалі 63–70 %, а вміст фюзенізованих компонентів ΣFC – в інтервалі 30–34 %, що свідчить про добре збалансовану структуру.

Вказані петрографічні характеристики мають безпосередній вплив на спіклівість ($C_{ш}$) та коксівність ($K_{ш}$) досліджених шихт [12].

Спіклівість є важливою властивістю вугілля, як сировини для отримання коксу, що обумовлює термічну деструкцію вугілля та утворення напівкоксу і коксу в процесі його карбонізації.

Рівень вмісту вітриніту середніх стадій метаморфізму ($R_0=0,9$ –1,49 %) відображає наявність складових вітриніту, які в процесі термічної деструкції утворюють значну кількість термостійких рідких продуктів, здатних, взаємодіючи з залишковим матеріалом деструкуючих зерен та інертними складовими органічної маси,

утворювати кокс різної міцності. Кількість зазначених складових вітриніту у перерахунку на органічну масу вугілля, що характеризує спіклівість шихти ($C_{ш}$), розраховується за формулою:

$$C_{ш} = \frac{\Sigma(0,90-1,49)Vt}{100}, \quad (3)$$

де $\Sigma(0,9-1,49)$ – вміст складових вітриніту з величиною показника відбиття від 0,90 до 1,49%; Vt – вміст мацералів групи вітриніту, %.

Чим вище величина комплексного показника $C_{ш}$, тим кращі характеристики міцності одержуваного з цієї шихти коксу.

Показник коксівності шихти ($K_{ш}$) є відношенням сумарного вмісту складових її вітриніту з показником відображення від 0,9 до 1,49 %, які виявляють високу спіклівість і мають здатність приймати опіснюючі присадки і мацералів групи ліптиніту, до суми опіснюючих мацералів і неспіклих складових вітриніту > 1,70 %. Природно, що чим вище це відношення, то більша ймовірність за інших рівних умов (середнього довільного показника відбиття і виходу легких речовин) отримання низько подрібнюваного коксу і такого, що мало стирається. Даний показник розраховується за такою формулою:

$$K_{\text{ш}} = \frac{(\sum(0,90-1,49)Vt/100) + L}{\sum FC + \sum(\geq 1,70)Vt/100}, \quad (4)$$

де $\sum(0,90-1,49)$ – вміст складових вітриніту з величиною показника відбиття від 0,90 до 1,49%; Vt – вміст мацералів групи вітриніту, %; L – вміст мацералів груп ліптиніту, %; $\sum FC$ – сума мацералів $(I+2/3Sv)\%$; $\sum(\geq 1,70)Vt/100$ – вміст складових вітриніту з величиною показника відбиття 1,70% і більше.

Згадані показники $C_{\text{ш}}$ і $K_{\text{ш}}$ розраховані щодо досліджених вугільних шихт та наведені в табл. 6.

Аналіз отриманих результатів показує, що найвищими значеннями цих показників характеризуються шихти третього та четвертого варіантів. Для них характерне оптимальне співвідношення компонентів із різним ступенем метаморфізму, що забезпечує достатній вихід пластичної маси та ефективне зв'язування інертних складових.

Найнижчі значення показників $C_{\text{ш}}$ і $K_{\text{ш}}$ отримані для другого варіанта шихти. Це пов'язано зі збільшенням частки фюзенізованих компонентів та зниженням вмісту вітриніту. Однак, як буде показано нижче, зниження цих показників не призвело до погіршення якості отриманого коксу, оскільки негативний вплив був

компенсований сприятливими значеннями інших технологічних характеристик, зокрема індексу основності, пластичності та здатності до ущільнення.

Таким чином, аналіз технологічних і петрографічних характеристик дослідних шихт показав, що всі запропоновані варіанти мають потенційну придатність для отримання доменного коксу. Водночас найбільш перспективними з точки зору подальшої оптимізації складу шихти є варіанти 2–4, у яких забезпечується більш сприятливе поєднання пластичних властивостей, петрографічної структури та показників основності мінеральної частини.

3.2. Результати лабораторного коксування та якості отриманого коксу

Підготовлені варіанти вугільних шихт були піддані лабораторному коксуванню у 5-кг печі конструкції ДП «УХІН». Дослідження проводили для двох способів завантаження: гравітаційного (3–4 к/б) та трамбованого (6 к/б). Для оцінювання якості отриманого коксу визначали вихід коксу, показники технічного аналізу, гранулометричний склад, механічну міцність, структурну міцність за Грязновим, реакційну здатність CRI та післяреакційну міцність CSR. Показники якості отриманого коксу наведені в табл. 7.

Таблиця 7

Показники якості отриманого коксу

Варіант	Технічний аналіз, %			Вихід, %	Крупність коксу					Механічна міцність, %		Структурна міцність за Грязновим, %	Реакційна здатність та післяреакційна міцність, %			
	A^d	S_t^d	V^{daf}		B_{κ}	$K_{<25}$	K_{25-40}	K_{40-60}	K_{60-80}	$K_{>80}$	Π_{25}		I_{10}	CM	CRI	CSR
Гравітаційне завантаження (3-4 к/б)																
1	11,5	0,54	1,1	76,3	1,7	0,3	15,0	61,5	21,5	92,4	6,7	89,25	38,6	50,0		
2	12,4	0,47	0,8	76,0	2,3	1,4	12,1	55,5	28,5	93,7	5,2	91,84	32,7	60,9		
3	11,2	0,51	1,1	77,0	2,4	0,8	6,7	75,2	14,9	93,4	5,6	89,51	34,0	53,8		
4	11,8	0,47	1,7	77,6	2,7	1,4	20,6	63,9	11,4	93,0	6,0	89,87	34,3	54,6		
Трамбоване завантаження (6 к/б)																
1	10,9	0,67	2,2	75,1	3,1	3,3	17,9	68,2	7,5	91,2	7,6	88,10	37,1	49,1		
2	12,0	0,41	0,6	74,4	3,3	2,3	12,8	70,7	10,9	92,0	6,7	89,76	30	59,9		
3	10,7	0,53	0,9	75,7	4,8	1,5	14,4	79,3	0	91,6	7,2	89,67	34,4	53,5		
4	11,2	0,46	0,6	76,0	3,7	2,2	14,9	66,8	12,4	91,5	7,3	89,33	34,1	53,8		

Аналіз результатів лабораторного коксування показує, що всі досліджені варіанти шихт забезпечили отримання коксу з високими показниками механічної міцності та прийнятними характеристиками реакційної здатності. Вихід коксу для шихт гравітаційного завантаження становив 76,0–77,6 %, а для трамбованих шихт – 74,4–76,0 %. Дещо нижчий вихід коксу при трамбуванні пов'язаний із підвищенням вмістом вологи у вихідній шихті та особливостями формування ущільненого вугільного пирога.

Вміст золи отриманого коксу закономірно корелює із зольністю вихідних шихт. Для коксу гравітаційного завантаження значення A^d становили 11,2–12,4 %, а для трамбованого – 10,7–12,0 %. Найнижчою зольністю характеризувався кокс третього варіанта для обох способів завантаження ($A^d = 11,2$ та 10,7 % відповідно), що відповідає найнижчій зольності вихідної шихти цього варіанта.

Важливим показником якості доменного коксу є його механічна міцність. Отримані результати свідчать,

що всі варіанти забезпечили високий рівень показника міцності після випробування у барабані P_{25} .

Для коксу, отриманого з гравітаційних шихт, значення P_{25} становили 92,4–93,7 %, тоді як для трамбованих шихт – 91,2–92,0 %. Таким чином, у межах проведених лабораторних досліджень гравітаційне завантаження забезпечило дещо вищі значення механічної міцності. Це пояснюється відмінностями у складі дослідних шихт, оскільки переваги трамбованого завантаження за рахунок підвищеної щільності та рівномірності прогрівання не завжди компенсують вплив вихідних петрографічних характеристик.

Показник стираності I_{10} змінювався в межах 5,2–6,7 % для гравітаційного та 6,7–7,6 % для трамбованого завантаження. Найкращі значення цього показника отримано для коксу другого варіанта гравітаційного завантаження ($I_{10} = 5,2$ %) та третього варіанта трамбованого завантаження ($I_{10} = 7,2$ %).

Разом з тим, механічна міцність не є єдиним визначальним показником придатності коксу для доменного процесу. Особливе значення мають характеристики поведінки коксу в умовах високотемпературної взаємодії з CO_2 , які оцінюються показниками CRI та CSR [11].

Аналіз отриманих значень CRI та CSR показує, що найгірші показники отримано для базового першого варіанта шихти. Для нього значення CRI становили 38,6 % для гравітаційного та 37,1 % для трамбованого завантаження, а CSR – відповідно 50,0 та 49,1 %. Такий результат пов'язаний із підвищеним вмістом у складі шихти газового вугілля 3Ф «Добропільська», яке характеризувалося підвищеним індексом основності вихідної мінеральної частини та менш сприятливими пластично-в'язкими характеристиками.

Найкращі показники реакційної поведінки коксу отримані для другого варіанта шихти. При цьому значення CRI становили 32,7 % для гравітаційного та 30,0 % для трамбованого завантаження, а CSR – 60,9 та 59,9 % відповідно.

Отриманий результат є особливо важливим з технологічної точки зору, оскільки другий варіант передбачав заміну частини газового вугілля 3Ф «Добропільська» на вугілля Semi Soft. Така заміна дозволила знизити індекс основності шихти до 1,84–1,80 та сформувати більш сприятливу структуру мінеральної частини коксу. У результаті зменшилась реакційна здатність коксу та підвищилась його здатність зберігати міцність після взаємодії з діоксидом вуглецю.

Варіанти шихт 3 та 4 із поступовим зменшенням газового вугілля 3Ф «Добропільська» та вугілля CSM і збільшенням вмісту вугілля EVL Premium та Venture також забезпечують високоякісний, низькорекційний кокс із покращеною структурною та механічною міцністю ($CM = 89,33$ – $89,67$ %; $P_{25} = 91,5$ – $93,4$) та задовільними показниками реакційної здатності та післяреакційної міцності ($CRI = 34,0$ – $34,4$ %; $CSR \approx 53,5$ – $54,6$ %). Відмінності між варіантами незначні, що пов'язано з близькими петрографічними характеристиками, адже основна відмінність в їх складах полягає в заміні в 3-му варіанті вугілля Marfork на вугілля Ramsey, а у 4-му варіанті навпаки. Своєю ж чергою, обидва вказані вугілля є типовими представниками вугілля марки «Ж» та дуже подібні між собою як за показниками технічного аналізу, так і петрографічних та пластично-в'язких характеристик.

Вплив сировинних факторів, виражених індексом основності I_b на показники якості отримуваних коксів проілюстровано на рис. 2.

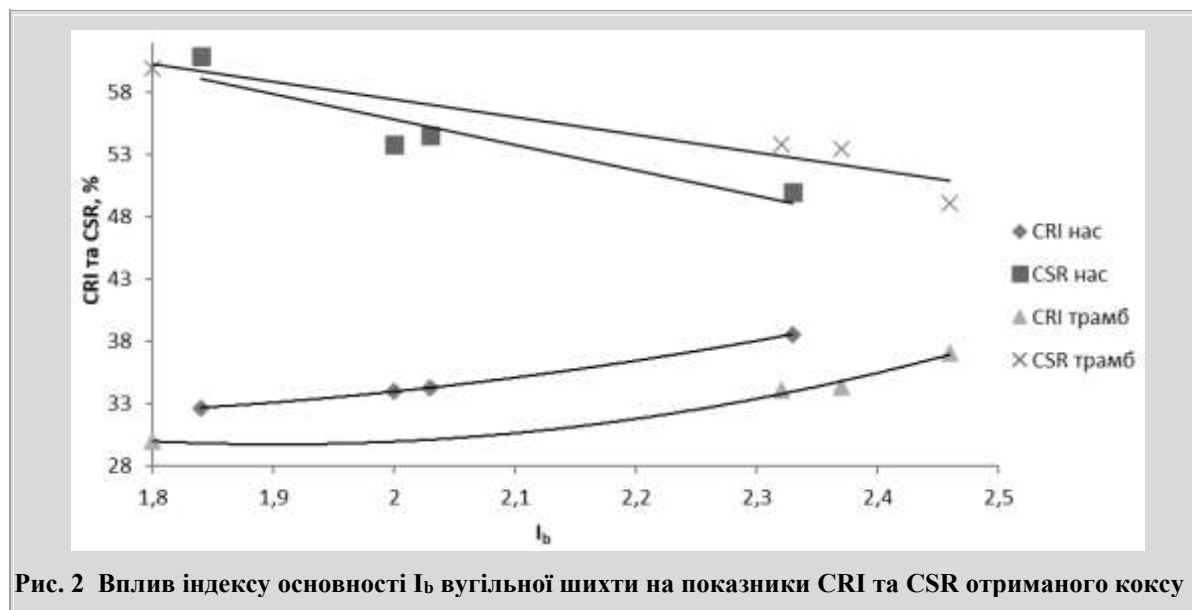


Рис. 2 Вплив індексу основності I_b вугільної шихти на показники CRI та CSR отриманого коксу

Як видно з рис. 2, досліджені варіанти шихт характеризуються певною залежністю показників CRI та CSR коксу від індексу основності I_b . Зі збільшенням I_b , що пов'язано зі зростанням вмісту мінеральної складової основного характеру, спостерігається підвищення реакційної здатності коксу та зниження його післяреакційної міцності. Водночас зміна I_b у межах досліджених значень не призводить до різкого погіршення якості коксу, що свідчить про визначальний вплив не лише мінерального складу, а й сукупності петрографічних та технологічних характеристик вугільних шихт.

Додатково було проведено оцінювання гранулометричного складу отриманого коксу, оскільки стабільність крупності є важливою характеристикою при його використанні у доменному процесі.

Встановлено, що спосіб завантаження суттєво впливає на характер розподілу класів крупності. При гравітаційному завантаженні частка крупного коксу класу понад 80 мм становила 11,4–28,5 %, тоді як для трамбованого завантаження цей показник був нижчим і знаходився в межах 0–12,4 %. Водночас при трамбуванні збільшується частка середніх класів крупності, зокрема 40–60 мм та 25–40 мм. Це свідчить про формування більш однорідної структури коксового пирога при трамбованому завантаженні, що забезпечує рівномірніший процес карбонізації та зменшує утворення надвеликих фрагментів коксу. Для умов доменної плавки така структура може бути перевагою, оскільки забезпечує більш стабільну газопроникність шару коксу.

Окремо було оцінено структурну міцність коксу за методом Грязнова. Отримані значення СМ становили 89,25–91,84 % для гравітаційного та 88,10–89,76 % для трамбованого завантаження. Встановлено, що вищі значення структурної міцності відповідають коксу з нижчою реакційною здатністю та вищою післяреакційною міцністю. Це підтверджує, що показник СМ може використовуватися як додатковий критерій оцінювання стабільності структури коксу [13].

Таким чином, проведені дослідження показали, що оптимізація складу вугільної шихти дозволяє суттєво покращити якість отриманого коксу без зміни технологічних параметрів процесу коксування. Найбільш перспективним серед досліджених варіантів є варіант 2, який забезпечив найкраще поєднання показників реакційної здатності ($CRI = 30,0\text{--}32,7\%$), післяреакційної міцності ($CSR \approx 60\%$) та механічної міцності. При цьому варіант 2 забезпечує зниження реакційної здатності коксу порівняно з базовим складом при одночасному підвищенні CSR, що є визначальним фактором його використання у доменному процесі.

Для умов КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» отримані результати мають практичне значення, оскільки підтверджують можливість адаптації складу вугі-

льної шихти до умов обмеженої доступності окремих марок вугілля у 2022–2025 роках із одночасним забезпеченням необхідного рівня якості доменного коксу.

3.3. Формування виходу побічних продуктів коксування

Окрім оцінювання якісних характеристик отриманого коксу, важливим завданням досліджень було визначення впливу складу вугільних шихт та способу їх підготовки на формування виходу основних побічних продуктів коксування, зокрема кам'яновугільної смоли, пірогенетичної води, коксового газу та сирого бензолу.

Формування виходу продуктів коксування визначається насамперед складом органічної маси вугілля, виходом летких речовин, співвідношенням мацеральних компонентів, стадією метаморфізму, а також технологічними умовами проведення процесу карбонізації. Зміна співвідношення окремих марок вугілля у складі шихти може впливати не тільки на якість отриманого коксу, а й на кількісне співвідношення між твердим продуктом та леткими продуктами термічної деструкції.

Для прогнозування виходу кам'яновугільної смоли при промисловому коксуванні використано відомі розрахункові залежності, що враховують вихід летких речовин та умови ущільнення шихти. Відповідно до [11], масовий вихід смоли від коксованої шихти для коксових батарей висотою до 6 м визначається за формулою:

$$P_{см} = 8,23 - 0,55V_{ш}^d + 0,0144V_{ш}^{d^2}, \quad (5)$$

Для трамбованої шихти:

$$P_{см} = 8,086 - 0,49V_{ш}^d + 0,0128V_{ш}^{d^2}, \quad (6)$$

Згідно з [12], масовий вихід смоли становить:

$$X = -18,36 + 1,53V^{daf} - 0,026(V^{daf})^2, \quad (7)$$

Результати розрахунку прогнозованого виходу кам'яновугільної смоли для досліджених варіантів шихт наведені у табл. 8.

Аналіз наведених даних показує, що спосіб підготовки та завантаження шихти суттєво впливає на прогнозований вихід смоли. Для шихт гравітаційного завантаження середній розрахунковий вихід смоли становить близько 4,1–5,0 %, тоді як для трамбованих шихт він підвищується до 4,1–5,7 %. Збільшення виходу смоли при трамбуванні пояснюється більш високою щільністю завантаження та відмінностями у перебігу процесів тепло- і масоперенесення під час карбонізації.

Таблиця 8

Розрахунковий вихід смоли для досліджених варіантів вугільних шихт, (%)

Варіант	Гравітаційне завантаження Вихід смоли за формулою	
	(6)	(8)
1	5,1	4,12
2	5,4	4,15
3	4,8	4,07
4	4,6	4,00
Середнє значення	5,0	4,08
	Трамбоване завантаження Вихід смоли за формулою	
	(7)	(8)
1	5,9	4,12
2	6,3	4,08
3	5,3	4,14
4	5,4	4,14
Середнє значення	5,7	4,12

Серед досліджених варіантів найбільший прогнозований вихід смоли характерний для шихти варіанта 2, що пов'язано з підвищеним вмістом у її складі вугілля марки Semi Soft та відповідно більш високим виходом летких речовин. Навпаки, варіанти 3 і 4 характеризуються дещо нижчим виходом смоли через більшу част-

ку компонентів із вищим ступенем метаморфізму та нижчим виходом летких речовин.

Експериментальні дослідження виходу смоли та пірогенетичної води проводили під час лабораторного коксування у печі місткістю 5 кг. Отримані результати наведені у табл. 9.

Таблиця 9

Результати визначення виходу смоли та пірогенетичної води при лабораторному коксуванні гравітаційних та трамбованих шихт

Зразки	Маса завантаження, г	Wa, %	Волога шихти, г	Надсмольна вода, г	Пірогенетична вода, г	Пірогенетична вода, %	Маса смоли, г	Вихід смоли, %
Гравітаційна об'єднана (вар.1,3,4)	13500	9,0	1215	1632,1	417,1	3,1	290,90	2,15
Гравітаційна варіант 2	4500	9,0	405	565,72	160,72	3,6	145,95	3,24
Вар. 2 трамбована	5000	12,5	625	807,09	182,09	3,6	127,10	2,54
Вар. 3 трамбована	5000	12,5	625	931,25	306,25	6,1	154,35	3,09
Вар. 4 трамбована	5000	12,5	625	752,62	127,62	2,6	117,03	2,34

Порівняння експериментальних та розрахункових значень показує, що фактичний вихід смоли у лабораторних умовах є нижчим за прогнозований. Це пов'язано з особливостями проведення лабораторного коксування, зокрема з меншим масштабом установки, відмінностями теплообміну та можливими втратами частини смолистих речовин разом із парогазовим потоком.

Серед досліджених варіантів найбільший експериментальний вихід смоли отримано для трамбованої

шихти варіанта 3 (3,09 %) та гравітаційної шихти варіанта 2 (3,24 %). Зазначена закономірність узгоджується з особливостями складу цих шихт. Зокрема, у складі варіанта 3 міститься 13 % вугілля Ramsey (США), яке характеризується найвищим серед досліджених компонентів вмістом водню (5,27 % у перерахунку на сухий беззолний стан). Підвищений вміст водню сприяє більш інтенсивному утворенню рідких продуктів термічної деструкції, що може пояснювати збільшення виходу смоли та пірогенетичної води.

Водночас для всіх досліджених варіантів відмінності у виході смоли є відносно незначними, що свідчить про стабільність формування побічних продуктів при використанні запропонованих складів шихт.

Оцінювання виходу коксового газу виконували відповідно до ДСТУ 7689:2015 «Вугілля кам'яне. Метод визначення виходу хімічних продуктів коксування» за залежністю:

$$V_g = 7,38 \cdot V_d + 126, \text{ м}^3/\text{т} \quad (8)$$

Для визначення орієнтовного складу коксового газу додатково проведено розрахунок переходу сірки з вугільної шихти у газову фазу. При цьому прийнято, що 90 % сірки, яка не переходить у кокс, розподіляється між коксовим газом та смолою. Результати розрахунку виходу коксового газу та концентрації сірководню наведені у табл. 10.

Таблиця 10

Вихід коксового газу та концентрація сірководню

S ^{dt}		Вихід кок- су, %	% переходу сірки у газ та смолу	Вихід газу за ДСТУ	Концентрація сірководню у коксівому газі, г/м ³
шихта	кокс				
Гравітаційне завантаження					
0,68	0,54	76,3	0,27	356	6,8
0,56	0,47	76,0	0,20	363	5,0
0,66	0,51	77,0	0,27	350	6,9
0,58	0,47	77,6	0,22	345	5,6
Трамбоване завантаження					
0,84	0,67	75,1	0,34	371	8,2
0,56	0,41	74,4	0,25	378	6,1
0,74	0,53	75,7	0,34	358	8,5
0,74	0,46	76,0	0,39	360	9,8

Згідно з отриманими результатами, вихід коксового газу для досліджених шихт знаходиться в межах 345–378 м³/т. Для трамбованих шихт спостерігається дещо вищий вихід газу, що пов'язано з підвищеним виходом легких речовин у відповідних варіантах.

Найнижча концентрація сірководню характерна для варіанта 2 як при гравітаційному (5,0 г/м³), так і при трамбованому завантаженні (6,1 г/м³), що пояснюється мінімальним вмістом загальної сірки у складі даних шихт. Водночас варіанти з підвищеним вмістом сірки у вихідній шихті характеризуються відповідним збільшенням вмісту H₂S у коксовому газі.

Вихід сирого бензолу оцінювали за розрахунковими залежностями [11]:

для завантаження у вигляді ненабитої шихти:

$$P_{сб} = 2,91 - 0,199V_{ш}^d + 0,0044V_{ш}^{d^2}, \quad (9)$$

для трамбованої шихти:

$$P_{сб} = 3,10 - 0,203V_{ш}^d + 0,0044V_{ш}^{d^2}, \quad (10)$$

Розраховані значення виходу сирого бензолу наведені у табл. 11.

Таблиця 11

Розрахунковий вихід сирого бензолу для досліджених варіантів шихт

Варіант	Гравітаційне завантаження
1	0,98
2	1,05
3	0,92
4	0,88
Середнє значення	0,96
Варіант	Трамбоване завантаження
1	1,21
2	1,29
3	1,06
4	1,09
Середнє значення	1,16

Отримані результати свідчать, що вихід сирого бензолу закономірно змінюється відповідно до виходу летких речовин у складі шихт. Для гравітаційного завантаження середній прогнозований вихід бензолу становить 0,96 %, а для трамбованого завантаження – 1,16 %. Найвище значення отримано для варіанта 2, що також узгоджується з підвищеним виходом летких речовин та особливостями складу цієї шихти. Таким чином, проведені дослідження показали, що запропоновані варіанти коригування складу вугільних шихт не призводять до суттєвих негативних змін у формуванні побічних продуктів коксування. Водночас заміна частини дефіцитного газового вугілля на альтернативні компоненти дозволяє отримати кокс із покращеними показниками якості при збереженні стабільного виходу смоли, коксового газу та сирого бензолу.

Для умов КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» у 2022–2025 роках отримані результати мають практичне значення, оскільки підтверджують можливість адаптації складу вугільної шихти до змінної доступності окремих марок вугілля без погіршення технологічних показників коксування та із прогнозованим рівнем виходу цінних хімічних продуктів

Практичне значення отриманих результатів для КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» набуває особливої актуальності з урахуванням історичної ролі підприємства у розвитку металургійної галузі України. У 2025 році виповнюється 80 років від початку промислового становлення підприємства, яке бере свій відлік від отримання першої плавки сталі 20 серпня 1939 року та подальшого формування у післявоєнний період потужного металургійного комплексу з повним виробничим циклом. За цей час підприємство пройшло декілька етапів технологічного розвитку: від введення основних металургійних агрегатів у 1950–1970-х роках до інтеграції коксохімічного виробництва у 1997 році та входження до міжнародної корпорації «АрселорМіттал» у 2007 році. Важливим етапом модернізації стало введення в експлуатацію коксових батарей №5 та №6 із технологією трамбування вугільної шихти, що розширило можливості використання різних видів коксівного вугілля та підвищило гнучкість підготовки виробничих шихт.

В умовах сучасних викликів, пов'язаних із воєнним станом, зміною логістичних маршрутів та необхідністю використання альтернативних джерел коксівного вугілля, результати проведених досліджень мають не лише наукове, а й безпосереднє практичне значення. Встановлені закономірності впливу марочного складу вугілля, петрографічних характеристик, індексу основності та параметрів підготовки шихти на якість отриманого коксу створюють основу для оперативного коригування складу виробничих шихт КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Запропоновані варіанти дозволяють за-

безпечити стабільне отримання металургійного коксу із необхідним комплексом механічних та реакційних властивостей при раціональному використанні доступної вугільної сировини, що відповідає сучасним завданням розвитку підприємства та збереженню його ролі одного з ключових виробників металургійної продукції України



Висновки

1. Досліджено технологічні, петрографічні та пластично-в'язкі характеристики 13 марок вугілля різного походження та сформовано чотири варіанти вугільних шихт для гравітаційного і трамбованого завантаження з урахуванням вимог до якості доменного коксу. Встановлено, що варіювання співвідношення компонентів шихти дозволяє регулювати її спікливість, коксівність, індекс основності та прогнозовані характеристики отриманого коксу.

2. Показано, що використання в складі шихти вугілля Semi Soft із низьким індексом основності сприяє зниженню реакційної здатності коксу та підвищенню його післяреакційної міцності. Найкращі показники якості коксу отримано для другого варіанта шихти, у якому заміна частини газового вугілля 3Ф «Добропільська» на австралійське вугілля Semi Soft забезпечила досягнення значень CRI 30,0–32,7 % та CSR 59,9–60,9 %.

3. Встановлено, що застосування технології трамбованого завантаження забезпечує підвищення щільності вугільного пирога та зміну гранулометричних характеристик отриманого коксу, однак ефект ущільнення залежить від правильно підбраного компонентного складу шихти. Оптимізація складу дозволяє компенсувати відмінності між гравітаційним і трамбованим способами завантаження та отримувати кокс із високими показниками механічної і реакційної міцності.

4. Визначено вплив петрографічних характеристик вугільних шихт на якість коксу. Показано, що комплексні показники спікливості ($C_{ш}$) та коксівності ($K_{ш}$),

розраховані на основі вмісту реакційноздатних складових вітриніту, фюзенізованих компонентів і ліптиніту, можуть використовуватися для прогнозування міцнісних характеристик коксу та вибору оптимального складу шихти.

5. Встановлено, що запропоновані варіанти шихт забезпечують отримання коксу, придатного для використання в доменному виробництві, із покращеними показниками механічної міцності (P_{25}), стираності (I_{10}), структурної міцності за Грязновим та показниками CRI/CSR порівняно з базовим складом на основі високої частки газового вугілля ЗФ «Добропільська».

6. Проведено оцінювання виходу побічних продуктів коксування та встановлено, що зміна складу шихти не призводить до суттєвого зниження виходу смоли, коксового газу та сирого бензолу. Водночас використання трамбованих шихт забезпечує дещо вищий вихід легких продуктів, що пов'язано з особливостями тепло-і масообмінних процесів під час карбонізації.

7. Запропоновані варіанти вугільних шихт можуть бути використані як основа для оптимізації сировинної бази КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в умовах обмеженої доступності окремих марок вугілля. Найбільш перспективним є варіант шихти №2, який забезпечує оптимальне співвідношення технологічних властивостей сировини, стабільність процесу коксування та формування коксу з підвищеною експлуатаційною ефективністю в доменному процесі.

Бібліографічний список

1. Babich, A., Senk, D., & Gudenau, H. W. (2009). Effect of coke reactivity and nut coke on blast furnace operation. *Ironmaking & Steelmaking*, 36(3), 222–229. <https://doi.org/10.1179/174328108X378242>

2. Flores, B. D., Borrego, A. G., Diez, M. A., da Silva, G. L. R., Zymla, V., Vilela, A. C. F., & Osório, E. (2017). How coke optical texture became a relevant tool for understanding coal blending and coke quality. *Fuel Processing Technology*, 164, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.03.020>

3. Singh, R., Ghosh, T. K., & Nag, D. (2018). Microtextural analysis of coke from single and binary blend and its impact on coke quality. *Ironmaking & Steelmaking*, 45(8), 760–768. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1328870>

4. Miroshnychenko, D. V., Koval, V. V., Borysenko, O. L., Bannikov, L. P., Mukina, N. V., & Nedbailo, S. H. (2025). Influence of coal quality and its preparation on the efficiency of blend tamping and coke quality. *Journal of*

Coal Chemistry, 6, 14–29. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2025-0-6-14-29>

5. Statista. (2024). *Forecasted price of coking coal worldwide from 2020 to 2027, by type*. <https://www.statista.com/statistics/779868/forecasted-price-of-coking-coal-by-type/>

6. North, L., Blackmore, K., Nesbitt, K., & Mahoney, M. R. (2018). Models of coke quality prediction and the relationships to input variables: A review. *Fuel*, 219, 446–466. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.062>

7. Григоров, А. Б., & Зеленський, О. І. (2024). Використання органічних добавок в процесі коксування вугільної шихти. *Вуглехімічний журнал*, 6, 7–13. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2024-0-6-7-13>

8. Zheng, H., Zhang, X., Wang, Y., & Li, J. (2022). Comprehensive review of characterization methods for carbon materials. *Materials*, 15(1), 174. <https://doi.org/10.3390/ma15010174>

9. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 18894:2018 Coke — Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR)*. ISO. <https://www.iso.org/standard/72266.html>

10. ASTM International. (2017). *ASTM D5341/D5341M-17: Standard test method for measuring coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR)*. ASTM International. https://www.astm.org/d5341_d5341m-17.html

11. Kumar, D., Saxena, V. K., Tiwari, H. P., Nandi, B. K., Verma, A., & Tiwary, V. K. (2022). Variability in Metallurgical Coke Reactivity Index (CRI) and Coke Strength after Reaction (CSR): An experimental study. *ACS Omega*, 7, 13224–13234. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04270>

12. Diez, M. A., Alvarez, R., & Barriocanal, C. (2002). Coal for metallurgical coke production: Predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. *International Journal of Coal Geology*, 50(1–4), 389–412. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(02\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00123-4)

13. Donskoi, E., Poliakov, A., Mahoney, M. R., & Scholes, O. (2013). Novel optical image analysis coke characterisation and its application to study of the relationships between coke structure, coke strength and parent coal composition. *Fuel*, 114, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.047>

14. Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут. (2002). *Методичні рекомендації щодо планування обсягів виробництва основних видів продукції на коксохімічних підприємствах України*. Харків: УХІН.

15. Ковальов, Є. Т. (Ред.). (2009). *Уловлювання та переробка хімічних продуктів коксування*. У: Довідник коксохіміка (Т. 3). Харків: Видавничий Дім «ІНЖЕК».

OPTIMIZATION OF COAL BLEND COMPOSITION AND COKING CONDITIONS AT THE COKE PLANT OF PJSC “ARCELORMITTAL KRYVYI RIH” UNDER CONDITIONS OF RAW MATERIAL BASE CHANGES AND MARTIAL LAW IN UKRAINE© N.V. Mukina¹*Coke and By-Product Plant of PJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”, 50095, Kryvyi Rih, Krivorozhstal st., 1, Ukraine*V.V. Koval²*STATE ENTERPRISE “UKRAINIAN STATE RESEARCH INSTITUTE FOR CARBOCHEMISTRY (UKHIN)”, 61023, Kharkiv, 7 Vesnina St., Ukraine*D.V. Miroshnychenko³*National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” (NTU “KhPI”), 61002, Kharkiv, 2 Kirpichova St., Ukraine*¹ Natalya V. Mukina, Ph.D. in Technical Sciences, Head of the Technical Department, ORCID: 0000-0003-3771-3293, Scopus ID: 57485403500, e-mail: Natalia.Mukina@arcelormittal.com² Valentine V. Koval, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Research Fellow of Coal Department, ORCID: 0000-0003-3771-3293, Scopus ID: 57208756691, e-mail: kovalen79@gmail.com³ Denis V. Miroshnychenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Oil, Gas and Solid Fuel Processing Technologies (OG and SF PT), ORCID: 0000-0001-6830-8747, Scopus ID: 6602479663, e-mail: dvmir79@gmail.com

Coke production under conditions of changing supply structure of coking coals requires the development of rational coal blend compositions capable of ensuring stable production of metallurgical coke with the required quality characteristics. The aim of this study was to determine the influence of coal blend composition and preparation parameters on blend technological properties, tamping process efficiency, coke quality, and yield of by-products of coking for the operating conditions of the coke plant of PJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”.

The paper presents the results of studying the effect of coal blend composition and preparation parameters on the efficiency of the coking process and the quality of the produced metallurgical coke under industrial conditions of the coke plant of PJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”. The research was carried out considering current industrial challenges associated with changes in the raw material base, limited availability of high-quality coking coals, and the necessity of maintaining stable operation of the enterprise under martial law conditions in Ukraine.

Real coal concentrates of different rank compositions were investigated, and the regularities of the influence of their petrographic, technological, and size characteristics on the formation of tamped coal blends and coke properties were established. It was found that an increase in the proportion of low-rank gas coal is accompanied by a decrease in coke yield, deterioration of mechanical properties, and an increase in coke reactivity. It was demonstrated that the application of tamped coal blends provides increased charging density and formation of coke with improved CRI/CSR characteristics. The most favorable combination of coke quality and blend technological properties was obtained for the second blend composition, for which the CRI values were 30.0–32.7 %, and the CSR value was approximately 60 %.

It was demonstrated that optimization of the coal blend composition enables more efficient utilization of available coal resources without significant deterioration of metallurgical coke quality. The obtained results can be used for selecting industrial coal blend compositions and preparing industrial-scale trials in coke production.

The influence of coal blend crushing degree on energy consumption during tamping and formation of coal cake density was established. The obtained results correspond to modern approaches to optimization of tamped coal blend preparation and confirm the necessity of comprehensive consideration of coal quality and technological parameters of its preparation.

The practical significance of the study consists in determining a rational coal blend composition for the conditions of the coke plant of PJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”, which enables stable production of metallurgi-

cal coke under changing coal supply conditions. The research results can be applied for further improvement of coal blend preparation technology, including the use of modern technological additives and methods for regulating the caking properties of coal mixtures.

Keywords: coal blend; coking; metallurgical coke; coke plant of PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih"; coal blend tamping; raw material base; coke quality; petrographic composition; size composition; martial law.

Corresponding author: N. V. Mukina, e-mail: Natalia.Mukina@arcelormittal.com

Manuscript received 2026-04-21

Accepted for publication 2026-07-01

Published 2026-07-22

This article is licensed under a CC BY 4.0 license

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-4-26-37

Спеціальність G1. УДК 662.749.2:662.741.3

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТРАМБУВАННЯ ШИХТИ ТА РЕЖИМІВ ОБІГРІВУ КАМЕР КОКСУВАННЯ НА КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»

© М.В. Галушкін¹, А.О. Колупайко²

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

О.В. Ситник³, О.Л. Борисенко⁴, І.В. Шульга⁵

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

¹ Галушкін Микола Володимирович, директор з коксохімічного виробництва та енергетики, ORCID: 0009-0004-7465-3351, e-mail: Nikolay.Galushkin@arcelormittal.com

² Колупайко Анатолій Олександрович, нач. коксового цеху № 1 КХВ, ORCID: 0009-0001-0320-7440, e-mail: anatoliy.kolupayko@arcelormittal.com

³ Ситник Олексій Володимирович, канд. техн. наук, ст. досл., провідний наук. співр. коксового відділу (КО), ORCID: 0009-0006-2544-4275, Scopus ID: 37125125000, e-mail: aleksejsytnik48@gmail.com

⁴ Борисенко Олександр Людвинович, канд. техн. наук, с.н.с., заступник директора з наукової роботи та управління системою якості досліджень, ORCID: 0000-0002-3842-9158, Scopus ID: 36805525000, e-mail: zd@ukhin.org.ua

⁵ Шульга Ігор Володимирович, канд. техн. наук, доц., с.н.с., зав. КО, ORCID: 0009-0007-8677-9180, Scopus ID: 59473856500, e-mail: ko@ukhin.org.ua

Показано, що технологія отримання коксу з трамбованої шихти була розроблена з метою розширення сировинної бази коксохімічного виробництва та підвищення ефективності використання вугільних ресурсів. Її впровадження дозволило залучати до коксування значні обсяги слабкокксового та дрібнофракційного вугілля, яке не придатне для традиційної насипної технології завантаження в коксові печі. Завдяки попередньому ущільненню шихти забезпечується формування стабільного вугільного пирогу, що сприяє рівномірному процесу коксування та отриманню коксу з високими міцнісними характеристиками.

Внаслідок російської агресії виникли проблеми з вугільною сировинною базою для коксування, у результаті чого підприємство змушене здійснювати переорієнтацію сировини та замість слабкокксового вугілля вводити до складу шихти вугільні концентрати, які використовуються для виробництва коксу за традиційною технологією.

Нерівномірність поставок вугільних концентратів і нестабільність їх марочного складу змусили персонал підприємства спільно з колективом ДП «УХІН» проводити регулярні дослідження вугільних характеристик та розробляти оптимальні склади шихт для отримання коксу за технологією трамбу-

вання. Так, до шихти для трамбування вперше почали вводити значну кількість газового, коксового та жирного вугілля, які суттєво відрізняються за своєю трамбуємістю. Для запобігання обвалам вугільного пирога багаторічний досвід та професіоналізм робочого колективу підприємства дозволили розробити вдосконалені програмні рецептури, за якими виконується трамбування у трамбувально-завантажувально-виштовхувальній машині (ТЗВМ). Ці програми дають можливість виконувати трамбування шихти при зміні її складових, тим самим коригуючи витрати енергії на виконання даного процесу.

У статті наведено розрахунок оптимального режиму обігріву камер коксування, спрямований на зменшення витрат коксового газу на обігрів та забезпечення стабільних умов процесу коксування, що в кінцевому підсумку сприяє отриманню якісного готового коксу з мінімальними енергетичними витратами.

Ключові слова: кокс, шихта, технологія трамбування, вугільний пиріг, міцність, щільність, трамбуємість, режим обігріву, коксовий газ.

Автор для листування О.В. Ситник, e-mail: aleksejsytnik48@gmail.com

Рукопис надійшов до редакції 01.04.2026

Прийнято до публікації 01.07.2026

Опубліковано 22.07.2026 Ця стаття ліцензується відповідно до міжнародної ліцензії CC BY 4.0



Оптимізація технології трамбування шихти

Трамбування вугільного пирога виконується в ході переміщення ТЗВМ вздовж батареї, а завантаження печей відбувається після позиціонування машини перед пустою камерою печі, з якої попередньо був виданий кокс. ТЗВМ обладнана бункером зберігання вугільної шихти, камерою трамбування та трамбувальними приладами. Крім трамбування ТЗВМ виконує наступні функції:

- зняття дверей з машинної сторони та їх очистку;
- очистку рами печі;
- видачу коксу з камери печі в тушільний вагон;
- переміщення в позицію подачі вугільного пирога в камеру печі та його завантаження;
- закривання дверей печі.

На рис. 1 наведено геометричні розміри камери коксування та трамбованого пирога. Щільність вологого трамбованого пирога в перерахунку на вологість 10 (± 1) % складає в середньому $1,13 \text{ т/м}^3$ та $1,017 \text{ т/м}^3$ на суху масу.

Після припинення процесу трамбування та при подачі вугільного пирога в піч його лінійні розміри зберігаються, що обумовлено капілярними та механічними силами зчеплення між вологими вугільними зернами. Міцність трамбованого пирога залежить від гранулометричного складу шихти, її вологості та параметрів підготовки. Так, за накопиченим практичним досвідом можна охарактеризувати гранулометричний склад шихти, який забезпечує досягнення високої міцності пирога, %: вміст класу $< 3,15 \text{ мм}$ 90-95; $< 1 \text{ мм}$ – 60-65; $< 0,5 \text{ мм}$ – 40-50; $< 0,25 \text{ мм}$ – 25-30. Вологість шихти повинна знаходитися в межах 10,5 – 12,0 %, надмірне зволоження починає діяти в негативну сторону дії сил зчеплення між зернами [3-5]. Пояснення закономірності даної тенденції наступне: в процесі трам-

бування вугільної шихти збільшення насипної щільності відбувається за рахунок взаємного ковзання зерен, їх переорієнтації та зближення між вологими зернами під дією механічних та капілярних сил зчеплення, зі зменшенням розмірів зерен капілярна сила зменшується пропорційно їх радіусу, при цьому в квадратичній залежності зростає число контактів зерен на одиниці площі. При надмірному збільшенні вологи шихти стан вологи може наблизитись до капілярного, коли весь міжзерновий простір заповнюється водою яка вже відіграє роль рідини та призводить до зменшення міцності та щільності трамбованого пирога, що тягне за собою його деформацію (обвали) при завантаженні в піч, або в самій печі. Навіть невеликі обвали під час завантаження пирога в камеру призводять до підвищення амперажу, утворення деформацій і можливих подальших обвалів, унаслідок чого пиріг не доходить до кінця камери печі. Це негативно впливає на кладку

обігрівальних простінок камери коксування та знижує продуктивність виходу коксу. Також такі випадки потребують додаткових робіт: зрізання пирога спеціальним фрезерним обладнанням з машинної сторони печі, під час виконання цих робіт відбуваються викиди коксового газу в навколишнє середовище, що погіршує екологічну обстановку. Далі машина повинна переміститися на край батареї для видачі залишку трамбованого пирога в спеціальний бункерний приймач, що, у свою чергу, збільшує час обороту коксування. Тому, для уникнення подібних явищ, потрібно постійно контролювати характеристичні показники шихти та її трамбуємість. У роботі наведено методи контролю міцності та щільності вугільного пирога [6]. ДП «УХІН» здійснює такий контроль за власною методикою – визначення трамбуємості на лабораторній установці. Установка складається з трамбувача і апарату для випробування трамбованого брикета на зріз (рис. 2-3).

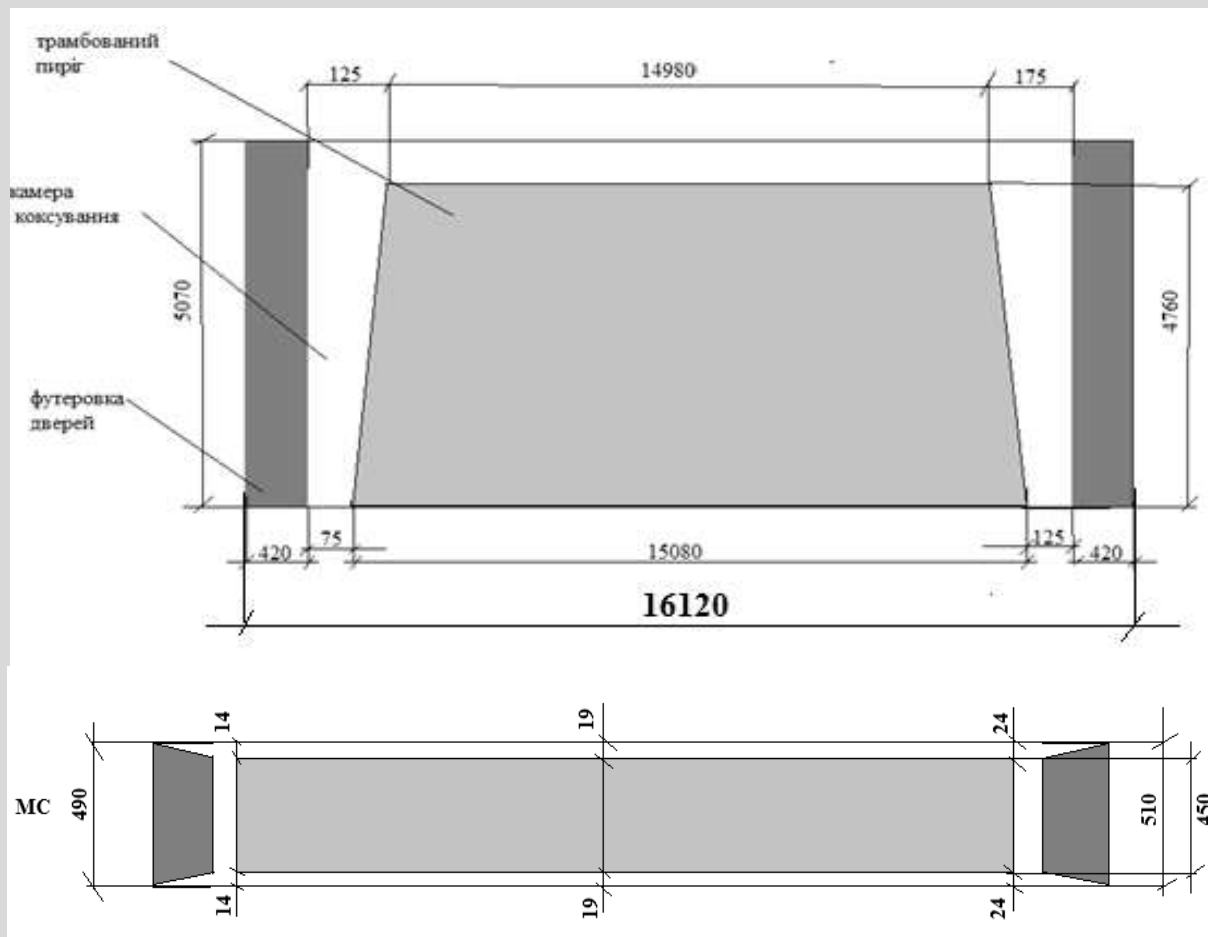


Рис.1 Геометричні розміри камери коксування та трамбованого пирога

До складу установки для трамбування входить масивна станина, на якій міцно гвинтами прикручується збірно-розбірна металева матриця, з внутрішнім розміром, мм: 100×100, висота 240; тобто корисний об'єм складає 2,4 л. Над матрицею зафіксований вантаж масою 42 кг, який вільно пересувається по вертикальних направляючих при падінні його на пуансон, розташований в матриці на вугільній завантажці. Маса проби вугілля (шихти), завантаженої в матрицю, становить 1,1 кг. Ущільнення (трамбування) вугільної завантажки відбувається трьома ударами вантажу, що падає з висоти 0,45 м на хвостовик пуансона. При трьох ударах вантажу робота трамбування становить 515 Дж/кг, що, приблизно, відповідає питомій роботі трамбування в ТЗВМ. Визначення міцності трамбованого брикета на зріз виконують у спеціальному апараті (рис. 3.). Трамбований брикет встановлюють на столик апарата 2 таким чином, щоб задньою, більш короткою гранню зразок 3 щільно стикався з обмежувальним бортиком столика рівномірно по всій довжині бортика, а рівно половина більш довгої його сторони консольно звисала зі столика, на нього поміщають накладку 10, простягнувши її через дві шпильки апарата, і злегка притискають пиріг накладкою за допомогою гайок. Після закріплення трамбованого брикета на столику на його консольну частину поміщають металеву пластинку 4, а на пластинку встановлюють контейнер 6. Товщина цієї пластинки в ~2 рази менше, ніж товщина накладки. Потім в контейнер 6 з бункера 8 за допомогою крана 9 насипають свинцевий дріб. Як тільки відбувається зріз трамбованого брикета, одразу ж припиняють подачу дробу краном 9. Після цього контейнер з дробом та платівкою зважують з точністю до 1 г. Міцність трамбованого пирога на зріз обчислюють як відношення ваги вантажу до площі зрізу в кПа, за формулою:

$$\sigma_{зз} = \frac{9,8 \cdot P}{S}, \quad (1)$$

де P – сумарна маса контейнера з дрібом і платівкою, кг; S – площа зрізу зразка, см^2 ; 9,8 – прискорення сили тяжіння, м/с^2 . Площу зрізу S (см^2) обчислюють за формулою:

$$S = b \cdot h, \quad (2)$$

де b – ширина трамбованого пирога, см; h – висота трамбованого пирога, см.

Даний метод дозволяє виявити зміну міцності вугільного пирога і вжити необхідних заходів з оптимізації його міцності і недопущення кількості обвалів при завантаженні.

Дослідження щодо визначення міцності трамбованого вугільного пирога з урахуванням впливу гранулометричного складу подрібнених зразків вугілля на його міцність при випробуванні на зріз дозволили побудува-

ти графічні залежності (рис. 4-5), що відображають вплив вмісту відповідного класу.

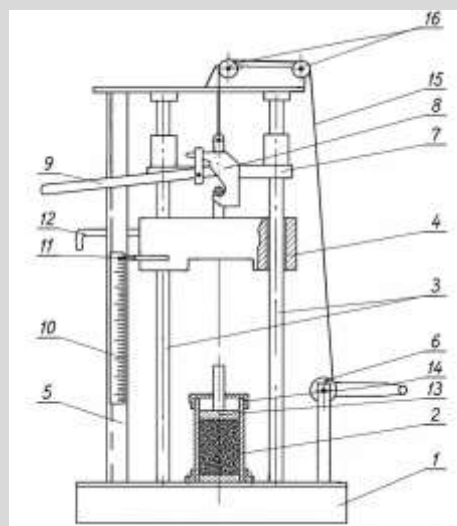


Рис. 2 Установка для трамбування: 1 – основа; 2 – матриця; 3 – направляюча; 4 – вантаж; 5 – стійка; 6 – лебідка; 7 – траверса; 8 – гак; 9 – коромисло; 10 – лінійка; 11 – стрілка; 12 – фіксатор; 13 – пуансон; 14 – кришка; 15 – трос; 16 – блок

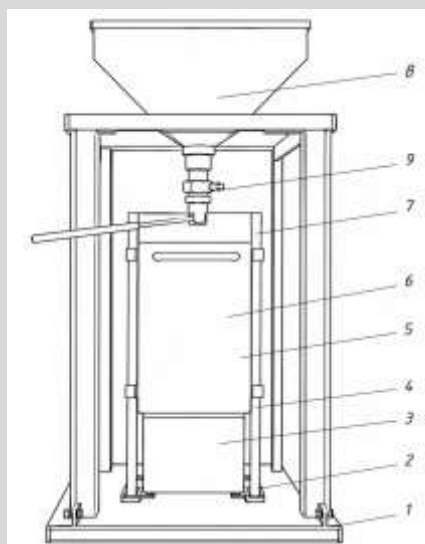


Рис. 3 Апарат для визначення міцності трамбованого пирога на зріз ($\sigma_{зз}$) 1 – основа, 2 – столик, 3 – випробуваний трамбований зразок (брикет), 4 – металева пластинка, 5 – направляюча контейнера, 6 – контейнер, 7 – пересувний пристрій бункера, 8 – бункер зі свинцевим дрібом, 9 – відсічний кран

Математична оцінка наведених на рис. 4-5 графічних залежностей представлена в табл. 1.

Отже, висока щільність пирога забезпечується низькою порізністю міжзернового простору, що позитивно впливає на міцність трамбованого пирога при завантаженні, покращення спікаючого потенціалу шихти, що сприяє збільшенню продуктивності отримання високоякісного коксу. Як зазначалось, отримання міцного і

щільного вугільного пирога залежить від роботи трамбуєчих приладів ТЗВМ. В безпосередній роботі трамбування вугільної шихти задіяні 10 живильників подачі шихти, 5 кареток з 30 трамбувальними штангами, до однієї каретки закріплені 6 трамбувальних штанг, які працюють на два живильника шихти. Висота підйому штанги становить 0,43 м.

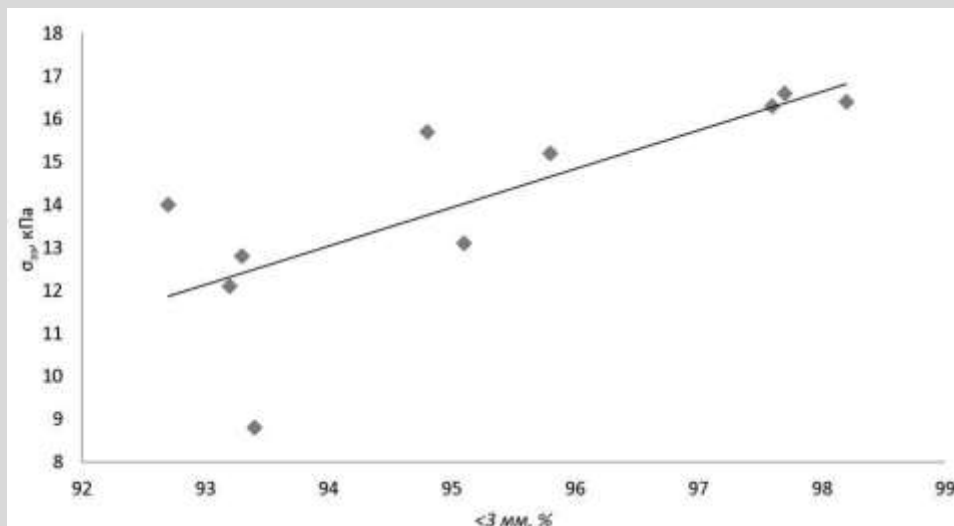


Рис.4 Вплив вмісту кл.< 3 мм у вугіллі на $\sigma_{зр}$

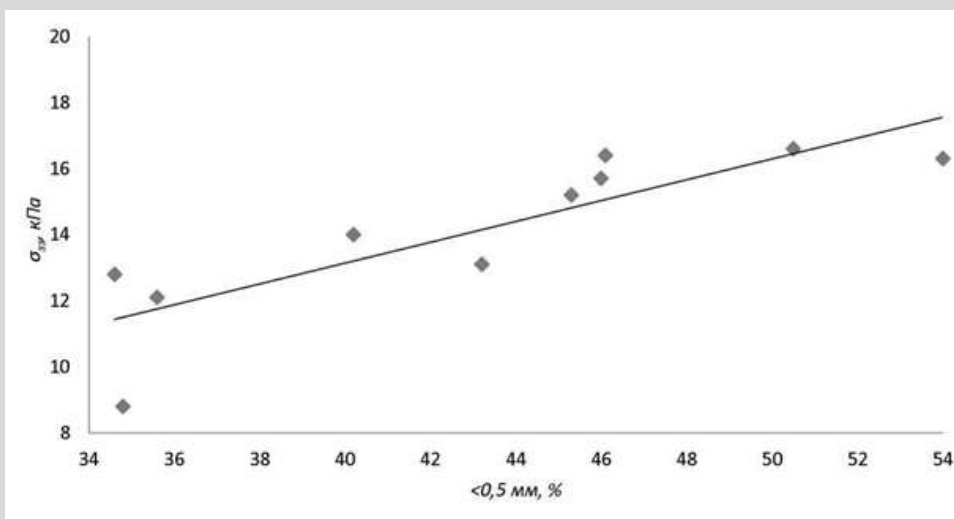


Рис. 5 Вплив вмісту кл.< 0,5 мм у вугіллі на $\sigma_{зр}$

Багаторічний досвід персоналу, який працює на підприємстві, дає змогу оперативно реагувати на зміни вхідної сировинної бази та застосовувати чіткі міри як до її підготовки, трамбування, так і ведення технологіч-

ного режиму коксування. Так, на підставі практичних спостережень операторами ТЗВМ були виконані відповідні висновки щодо удосконалення автоматичних програм-рецепторів ведення режиму трамбування. Дані

програми застосовуються індивідуально для шихти при зміні її марочної складової, вони відрізняються режимами запуску штанг та подачею шихти вібраційними живильниками в трамбувальну камеру. Тобто, в кожній програмі посекундно задано виконуючу дію, відлік починається з так званої «нульової» підсіпки шихти живильниками для утворення подушки на піддоні трамбувальної камери, а потім в роботу вступають

трамбувальні штанги та кількості разів вмикання/вимикання живильників, які забезпечують пошаровий рівень заповнення трамбувальної камери шихтою. Процес трамбування вважається закінченим, коли штанги вимикаються, переводяться в режим розрівнювання бугрів, які утворилися на поверхні пирога між молотками, виконується розрівнювання, далі підйом та фіксація в стопорне положення.

Таблиця 1

Математичні залежності і статистична оцінка

№	Вид залежності	R ² , %
1	$\sigma_{зр} = 0,901 \times (\text{вагова частка кл. } < 3,0 \text{ мм}) - 74,655$	57,09
2	$\sigma_{зр} = 0,3154 \times (\text{вагова частка кл. } < 0,5 \text{ мм}) + 0,5271$	72,73

Відзначимо, що «нульова» підсіпка шихти по висоті від піддону камери повинна становити приблизно 720 мм (± 80 мм). Дана величина має вкрай важливе значення, так як по-перше, саме цей прошарок утворює монолітну основу первинного шару, на якому буде триматися пиріг, по-друге, забезпечує зниження ударної сили молотків на піддон трамбувальної камери, що продовжує термін її експлуатації.

До прикладу по одній з програм-рецепторів загальний час трамбування шихти складає 9 хв, з них цикл трамбування - 5 хв 31 с: у цей час входить робота трамбувальних штанг 4 хв 55 с, робота живильників шихти - 2 хв 36 с (2 хв живильники працюють разом зі штангами, а 36 с самостійно), за одну хвилину відбувається 100 ударів штанг, тобто за 4 хв 55 с молотками виконується близько 500 ударів, частота падіння штанг становить 0,6 с, підготовка трамбованого пирога до завантаження в камеру коксування становить 3 хв 29 с (цей час може коливатися). Маса трамбованого пирога складає 37,8 т - при волозі 12,4 %, в перерахунку на суху масу - 33,113 т, з урахуванням «нульового» шару, маса однієї порції підсіпки шихти живильниками по висоті камери в середньому становить близько 7,56 т.

Питому роботу трамбування обчислюють за формулою:

$$A = \frac{n \times G \times v \times \tau \times h \times 9,8}{m}, \text{ Дж/кг} \quad (3)$$

де n - кількість штанг, шт.; G - маса трамбувальної штанги, кг; v - кількість ударів в хвилину, шт.; τ - чистий час трамбування, хв.; h - висота підйому штанги, мм; 9,8 - прискорення сили тяжіння, м/с²; m - маса пирога, т.

$$A = \frac{30 \times 357 \times 100 \times 4,55 \times 0,43 \times 9,8}{37800} = 543,25 \text{ Дж/кг,}$$

$$A_{\text{сух}} = \frac{30 \times 357 \times 100 \times 4,55 \times 0,43 \times 9,8}{33113} = 620,15 \text{ Дж/кг.}$$

З іншого боку, для забезпечення отримання стійкого трамбованого вугільного пирога робота трамбування має залежати від властивостей вугільної шихти. Зокрема, відомо, що вміст в шихті твердого, важко-

подрібнюваного газового вугілля, зерна якого і в подрібненій шихті мають більшу крупність, призводить до необхідності збільшення роботи трамбування, що має досягатись відповідним подовженням тривалості часу трамбування. Зволоження шихти сприяє поліпшенню трамбуємості, що дає змогу дещо знизити потрібний час трамбування. Аналогічним чином впливає і збільшення загального ступеня помелу шихти. Згідно з цим необхідна робота трамбування становитиме:

$$A = K \frac{\Gamma}{W \cdot \Pi} \quad (4)$$

де K - коефіцієнт пропорційності; Γ - вміст у шихті газового вугілля, %; W - робоча вологість вугільної шихти, що надходить на трамбування, %; Π - ступінь подрібнення шихти перед трамбуванням (т.зв. «помел»), тобто вміст в ній класу менше 3,15 мм, %.

Прирівнюючи ці два вирази для роботи, отримаємо рівняння:

$$\frac{n G v \tau h g}{m} = K \frac{\Gamma}{W \Pi} \quad (5)$$

Звідси необхідний час трамбування:

$$\tau = \frac{K m}{n G v h g} \cdot \frac{\Gamma}{W \Pi} \quad (6)$$

Перший дріб об'єднує сталі величини, тобто є константою трамбування:

$$C = \frac{K m}{n G v h g} \quad (7)$$

З урахуванням цього необхідний час трамбування:

$$\tau = C \frac{\Gamma}{W \Pi} \quad (8)$$

Оскільки величини K та C невідомі, їх можна визначити шляхом проведення спеціальних експериментальних робіт. Однак і не знаючи їх, можна визначити необхідний час трамбування за зміни властивостей шихти. Для цього необхідно прийняти базовий режим трамбування, який з виробничого досвіду забезпечує належну міцність трамбованого вугільного пирога з мінімальною кількістю обвалів. Шихта, використана за цього режи-

му, також є базовою. Тоді необхідний час трамбування для шихти з іншими властивостями становитиме:

$$\tau_2 = \tau_1 \cdot \left(\frac{\Gamma_2}{\Gamma_1}\right) \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \left(\frac{P_1}{P_2}\right). \quad (9)$$

Тут величини з індексом «1» відносяться до базової шихти, а з індексом «2» - до шихти з іншими властивостями.

Слід зазначити, що за зміни загального чистого часу трамбування τ відповідним чином пропорційно змінюються і його складові, зокрема, час трамбування до підсіпки та після підсіпки.

Вибір оптимального режиму обігріву камер коксування для виключення підвищеної витрати коксового газу на обігрів

На КБ № 5-6 кожен з опалювальних простінків середньою шириною 840 мм розділений на 32 вертикали, згрупованих в 16 пар. Відстань між осями пар вертикалів – 480 мм. Передача тепла від вертикалів до камери коксування здійснюється крізь обігрівачі стінки 105 мм завтовшки.

У відповідності з п. 10.177 ПТЕ-2017 правильний режим обігріву коксових печей має забезпечувати [9, 10]:

- 1) рівномірний нагрів коксового пирога за довжиною та висотою камери коксування, задані вихід та якість металургійного коксу;
- 2) задані вихід коксового газу та хімічних продуктів коксування, в першу чергу смоли кам'яновугільної та сирого бензолу;
- 3) високий ККД печей;
- 4) їх тривалий строк експлуатації;
- 5) мінімальну кількість викидів шкідливих речовин у довкілля.

Рівень температур в опалювальній системі у відповідності з п. 10.181 ПТЕ-2017 має встановлюватись за готовністю коксу, яку оцінюють за температурою в осевій площині коксового пирога, виміряною хромель-алюмелевими термопарами за 15 хв до видачі. Ця температура має підтримуватись в межах 1000-1100 °С в залежності від складу коксівної шихти, призначення отриманого коксу та конструкції печей.

На підставі п. 10.192 ПТЕ-2017 максимальна температура на поді будь-якого вертикалу опалювальних простінків через 20 с після припинення подачі газу не має перевищувати 1450 °С. Максимальні температури за довжиною простінків звичайно досягаються в 3-4-му вертикалах з коксового боку та можуть бути вищі, ніж в контрольних вертикалах, приблизно на 20 °С. Крім того, за довжиною батареї можливі коливання температур ще на ± 20 °С. Тому гранична температура, встановлювана в контрольних вертикалах, у відповідності з п. 10.186 ПТЕ-2017, не має перевищувати:

$$1450 - 2 \times 20 = 1410 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

В контрольних вертикалах машинного боку встановлюється нижча температура, ніж з коксового боку, оскільки з машинного боку камера коксування вужча і маса завантаження там менша, отже, відповідно меншою є і потреба в теплі. Різниця температур між контрольними вертикалами коксового та машинного боків встановлюється в межах 30-60 °С. За практичними даними така різниця температур забезпечує однакову готовність коксу по боках батареї.

Розрахункове визначення технічно обгрунтованого рівня температур в контрольних вертикалах виконується у відповідності з методикою [9, 12]. Так, для батарей № 5, 6 за проектним періодом коксування 24,5 години розрахунковий рівень температур в контрольних вертикалах в °С становить: з машинного боку – 1307; з коксового боку – 1337 [13], наприкінці періоду коксування, незалежно від його тривалості, температура по осі коксового пирога перед видачею має складати у відповідності з ПТЕ-2017 [10], 1000-1100 °С.



За зміни властивостей шихти та періоду коксування температуру в контрольних вертикалах слід коригувати з урахуванням наступних положень [11, 14-16]:

- 1) за подовження періоду коксування на 1 годину температури в контрольних вертикалах знижують на 15-30 °С та навпаки;
- 2) за збільшення вологості шихти на 1 % температури підвищують на 5-7 °С, та навпаки;
- 3) за збільшення виходу летких речовин з шихти на 1 % температуру підвищують на 6 °С та навпаки, оскільки за коксування шихти з підвищеним виходом летких речовин збільшується кількість парогазових продуктів, з якими до газозбірника уходить додаткова кількість тепла;
- 4) за збільшення насипної густини шихти на 10 кг/м³ (за рахунок зміни ступеня подрібнення, зокрема, внаслідок збільшення частки в шихті важко подрібнюваного газового вугілля з підвищеним виходом летких речовин та інших чинників) температуру в контрольних вертикалах слід підвищити на 3 °С та навпаки, оскільки

збільшення насипної густини призводить до підвищення маси шихти в камері, що, в свою чергу, вимагає додаткового підведення тепла;

5) за збільшення вмісту в шихті петрографічно неоднорідного вугілля на 10 %, що вимагає більшої кількості тепла для здійснення термохімічних перетворень, температуру в вертикалах слід підвищити на 3-4 °С, та навпаки.

Головним критерієм для перевірки відповідності встановленого температурного режиму заданому періоду коксування та властивостям перероблюваних шихт є рівень температур за віссю коксового пирога за 15 хв до видачі 1000-1100 °С.

За необхідності зміни температур в контрольних вертикалах за результатами виміру температур по осі пирога виходять з практичних даних про те, що зміна температури в контрольних вертикалах на 1 °С призводить до спів-спрямованої зміни температур по осі на 3 °С. Наприклад, для зміни температури по осі на 15 °С слід змінити температуру в контрольних вертикалах на:

$$\frac{15}{3} = 5^{\circ}\text{C}.$$

Зміна температури в контрольних вертикалах на 10 °С призводить до зміни температури за віссю коксового пирога на:

$$10 \times 3 = 30^{\circ}\text{C}.$$

Для нормальної експлуатації коксових печей потрібний рівномірний розподіл температур в опалювальній системі батареї. Для цього використовують сталі та змінні фактори регулювання обігріву [11].

До сталих факторів регулювання обігріву відносять:

А) для розподілу тепла вздовж батареї:

1) рівні розміри однакових за своїм призначенням конструктивних елементів опалювальної системи (поводові канали, колосникові решітки камери регенераторів, тип насадки та схема її укладання, косі ходи, корнюри, вертикали, канали для рециркуляції, перевальні вікна тощо);

2) застосування однакової за типом та розмірами газопідвідної та газовідвідної арматури, армування кладки та обслуговуючих механізмів коксових печей;

3) рівний гідравлічний опір опалювальних елементів та арматури в усіх печей батареї;

4) кришки знеграфічувального пристрою та калібровані діафрагми для подачі повітря до корнюрів;

Б) для розподілу тепла вздовж та за висотою опалювальних простінків:

1) калібровані газові пальники на печах з бічним підведенням, калібровані сопла або диски на печах з нижнім підведенням;

2) реєстри та розсікачі в гирлах косих ходів;

3) реєстри для зміни ступеня рециркуляції.

Витрата газу в кожному вертикальному каналі має бути пропорційна масі шихти, завантаженої в зону камери коксування навпроти цього вертикалу [9, 12, 13]. Крім цього, для компенсації підвищених тепловтрат у доквілля до крайніх вертикалів з обох боків камери треба подати газу на 40 % більше, а до передкрайніх – на 20 % більше, ніж до масових [9, 12, 17]. Розрахована за цією методикою розстановка діаметрів пальників за довжиною опалювального простінку наведений в табл. 2 [13].

Таблиця 2

Загальний розрахований розподіл пальників за діаметрами (мм) по довжині опалювального простінка для батарей № 5-6

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Розрах.	34,5	32,5	30,5	30,5	31,0	31,5	32,0	32,0
№	9	10	11	12	13	14	15	16
Розрах.	32,5	32,5	33,0	33,0	33,5	33,5	33,5	34,0
№	17	18	19	20	21	22	23	24
Розрах.	34,0	33,5	33,5	33,5	33,0	33,0	32,5	32,5
№	25	26	27	28	29	30	31	32
Розрах.	32,0	32,0	31,5	31,0	30,5	30,5	32,5	34,5

Нормативна витрата тепла на обігрів розроблена для печей ПВР із бічним підведенням опалювального газу та повітря. Вона застосовується під час проектування і будівництва нових печей зі строком експлуатації до 5 років, а також під час перекладання старих батарей. Ця витрата базується на результатах обстежень і дослідних робіт, виконаних ДП «КОКСОХІМСТАНЦІЯ», ДП «УХІН» та ДП «ГИПРОКОКС» на коксохімічних підприємствах України, і для зазначених умов становить

2,36 МДж/кг шихти. Для батарей, які експлуатують більше п'яти років або протягом періодів більших ніж проектні, або які мають непрацюючі печі, норматив питомої витрати теплової енергії корегують на коефіцієнти, які враховують строк експлуатації, наявність непрацюючих печей та фактичний період коксування.

Коефіцієнт Z, який враховує строк експлуатації батареї T, за $T \leq 5$ років беруть $Z = 1$. Для батарей, строк

експлуатації яких більше 5-ти років, коефіцієнт Z розраховують за формулою:

$$Z = 1,147 - 0,0113T + 0,000246T^2. \quad (10)$$

Коефіцієнт K_3 , який враховує непродуктивні витрати теплової енергії на підтримання в гарячому стані непрацюючих печей:

$$K_3 = 1 + \frac{n}{N-n} \cdot 0,5; \quad (11)$$

де 0,5 – коефіцієнт зниження витрат теплової енергії на непрацюючих печах; n – кількість непрацюючих печей; N – загальна проектна кількість печей в батареї. Коефіцієнт K_o , який враховує додаткові витрати теплоти під час роботи батарей за обороту печей 24 год та більше, розраховують за формулою:

$$K_o = 1 + \frac{K_{доф}(\tau\phi - 24)}{100 \cdot 24}, \quad (12)$$

де $K_{доф}$ – витрати теплової енергії поверхнею всієї коксової батареї в довкілля за періоду коксування 24 год, у відсотках від загальних витрат теплової енергії на коксування, $\approx 9,6$ %.

Норматив питомої витрати теплової енергії у МДж/кг для умов конкретної коксової батареї:

$$Q_n = Q_n^o Z K_3 K_o. \quad (13)$$

Норматив витрати коксового газу на опалення коксових печей в $\text{м}^3/\text{т}$ шихти розраховують за формулою:

$$q_n = \frac{Q_n \times 1000}{16,74}, \quad (14)$$

де 1000 – кількість кілограмів в тонні; 16,74 – середня теплотворна здатність коксового газу, МДж/м³ (4000 ккал/м³).

Фактична питома витрата теплової енергії в МДж/кг шихти:

$$Q_\phi = \frac{16,76V_\phi}{1000G_{ш}^d} \quad (15)$$

Фактична витрата коксового газу на обігрів коксових печей в $\text{м}^3/\text{т}$ шихти:

$$q_\phi = \frac{Q_\phi \times 1000}{16,74}. \quad (16)$$

Приведена фактична питома витрата теплової енергії до умов, що враховують конкретні властивості шихти:

$$Q_{прив} = Q_\phi + 0,033(10 - W_t^r) + 0,029(28 - V^{daf}), \quad (17)$$

де W_t^r – робоча вологість шихти, %; V^{daf} – вихід летких речовин із сухої знезоленої (т.зв. «горючої») маси шихти, %.

Приведена фактична витрата коксового газу на обігрів коксових печей в $\text{м}^3/\text{т}$ шихти:

$$q_{прив} = \frac{Q_{прив} \times 1000}{16,74}. \quad (18)$$

Для батарей № 5, 6 розрахунок витрати тепла в залежності від властивостей трамбованих шихт та періоду коксування здійснюється у відповідності зі скороченою Методикою розрахунку технічно обґрунтованих витрат тепла на коксування трамбованих шихт за наступним рівнянням [19]:

$$Q = 912(1 + 0,015(W_t^r - 11,2) + 0,01(V^{daf} - 33,7) + 0,005(\tau - 24,5)), \quad (19)$$

де 912 – значення витрати тепла на коксування, отримане для вологості трамбованої шихти $W_t^r = 11,2$ %, виходу летких речовин $V^{daf} = 33,7$ % та періоду коксування $\tau = 24,5$ години, ккал/кг сухої шихти; 0,015 (1,5 %) – коефіцієнт, що враховує збільшення витрати тепла на коксування за збільшення вологості трамбованої шихти на 1 %; W_t^r – робоча вологість трамбованої шихти, %; 0,01 (1 %) – коефіцієнт, що враховує збільшення витрати тепла на коксування за збільшення виходу летких речовин з горючої маси трамбованої шихти на 1 %; V^{daf} – вихід летких речовин з горючої маси трамбованої шихти, %; 0,005 (0,5 %) – коефіцієнт, що враховує збільшення витрати тепла на коксування за збільшення тривалості періоду коксування на 1 годину; τ – тривалість періоду коксування, годин;

З урахуванням пропорційності витрати тепла масі трамбованого вугільного пирога а, отже, густині сухої маси шихти в трамбованому вугільному пирозі, рівняння (19) можна записати наступним чином:

$$Q = 909\rho^d(1 + 0,015(W_t^r - 11,2) + 0,01(V^{daf} - 33,7) + 0,005(\tau - 24,5)), \quad (20)$$

де 909 – розрахункова витрата тепла на коксування трамбованої шихти з густиною сухої маси 1 т/м³; ρ^d – фактична густина трамбованого вугільного пирога, т/м³.

На підставі визначеної величини витрати тепла на коксування Q витрата газу на опалення в $\text{м}^3/\text{т}$ сухої шихти становитимуть:

– у фактичному об'ємі:

$$V_\phi = \frac{1000Q}{Q_i}; \quad (21)$$

де 1000 – кількість кілограмів в тонні; Q_i – фактична нижча теплота спалювання коксового газу, визначена у відповідності з Методикою розрахункового визначення показників теплотвірної здатності коксохімічної продукції [20].

– в об'ємі, приведеному до нижчої теплоти спалювання 4000 ккал/м³:

$$V_n = \frac{1000Q}{4000} = 0,25Q. \quad (22)$$

Основні технологічні чинники, що впливають на витрату тепла на коксування, визначені за даними спеціальних досліджень, виконаних ДП «УХІН» [12, 21].

Основними заходами, спрямованими на зниження витрат тепла на коксування і підвищення ККД коксових печей, є:

1) оптимізація складу і властивостей вугільних шихт: забезпечення заданого вмісту довгополум'яного і газового вугілля з високим виходом летких речовин, обмеження вмісту петрографічно неоднорідного вугілля, що містить 30-70 % інертніту, підвищення ступеня подрібнення вугільних шихт, впровадження прогресивних схем їх подрібнення (групове, диференційоване, вибіркове), забезпечення раціональної вологості вугільних шихт;

2) підвищення швидкості коксування - збільшення періоду коксування вище проектних значень, а, отже, і зменшення швидкості коксування, призводить до підвищення витрат тепла за рахунок збільшення витрат через тепловіддавальні поверхні батарей;

3) раціональна величина коефіцієнта надлишку повітря - його збільшення призводить до зростання витрат тепла;

4) рівномірний розподіл газів уздовж обігрівальних простінок, впровадження раціонального теплотехнічного режиму крайніх і предкрайніх вертикалів, що дозволяє знизити витрату тепла на 0,5-1,5 %;

5) зниження температури продуктів згоряння, які залишають опалювальну систему, що дозволяє утилізувати більше тепла в регенераторі і знизити витрату тепла на коксування;

6) стан кладки батарей – незаграфічена, або нещільна кладка камери коксування призводить до перетікання прямого газу в опалювальну систему. Це дозволяє трохи знизити витрату тепла на коксування за даними про кількість очищеного газу, що надійшла на обігрів, однак це зниження уявне - насправді відбуваються втрати газу і хімічних продуктів, фактичне зростання витрати тепла і, крім того, збільшуються викиди забруднюючих речовин в атмосферу з опалювальної системи коксових печей. Нещільності стінок регенераторів призводять до перетоків частини опалювального газу з висхідного прямо на низхідний потік, міняючи вертикалі. Це також призводить до підвищення витрат тепла і збільшення викидів шкідливих речовин в довкілля.

Практичне використання розроблених рекомендацій з оптимального режиму обігріву камер коксування дозволяє виключити підвищену витрату коксового газу на обігрів.

Висновки

У результаті освоєння технології отримання коксу з трамбованої вугільної шихти на підприємстві було вжито заходів щодо зменшення кількості обвалів пирога за рахунок контролю гранулометричного складу шихти, її вологості та удосконалення програм-рецепторів трамбування. Було знайдено рішення щодо визначення трамбуємості шихти, а також її міцності та

щільності. Дані заходи дозволили збільшити техніко-економічну ефективність виробництва коксу та хімічних продуктів коксування. Наразі продовжуються роботи з розроблення та впровадження нових методів визначення міцності трамбованого пирога.

Наведені раціональні параметри режиму обігріву камер коксування, спрямовані на зменшення витрат коксового газу на обігрів та забезпечення стабільних умов процесу коксування, що в кінцевому підсумку сприяє отриманню якісного готового коксу з мінімальними енергетичними витратами.



Бібліографічний список

1. Ковальов Є. Т. Теорія та практика виробництва доменного коксу високої якості з трамбованих шихт зниженої спекаемости. / Є. Т. Ковальов, Ю. С. Васильєв, В. М. Кузніченко, В. В. Кривонос., А. Б. Данилов, М. А. Соловійов // *Вуглехімічний журнал*. – 2009. – № 3-4. – С. 24 - 30.

2. Кривонос В. В. Освоєння технології трамбування на Алчевському КХЗ з використанням вугілля України та росії. / В. У Кривоніс, Ю. С. Васильєв, І. Д. Дроздник, В. М. Кузніченко, А. А. Лобов, Н. І. Малько. // *Вуглехімічний журнал*. – 1998. – № 3 - 4. – С. 10 - 14.

3. Мукіна Н.В. Коксування трамбованих вугільних шихт. Вміст газового вугілля $\geq 40\%$. / Н.В. Мукіна, Д.В. Мірошніченко. // *Вуглехімічний журнал*. – 2022. – № 4. – С. 4 - 16.

4. Чуб В. Є. Про вплив різних факторів на кількість обвалів трамбованих вугільних пирогів при завантаженні коксових печей. / В. Є. Чуб, С. Н. Дзекунов, О. Д. Мокрицьких, В. М. Кузніченко, Н. І. Малько. // *Вуглехімічний журнал*. – 2002. – № 3 - 4. – С. 15 - 18.

5. Білошапка І. В. Вплив якості вугільних концентратів на їх насипну щільність. // *Вуглехімічний журнал*. – 2011. – № 3 - 4. – С. 9 - 12.

6. Мукіна Н.В. Оптимізація виробництва доменного коксу за допомогою технології трамбування Дис. На здобуття вченого ступеня доктора філософії. – Харків: НТУ ХПІ, 2023 – 161 с. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov>

7. Мукіна Н.В. Сировинна база коксування КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» у період з 2017 по 2021 рік. / Н.В. Мукіна, Д.В. Мірошніченко // *Вуглехімічний журнал*. – 2021. – № 4. – С. 4 - 9.
8. Мукіна Н.В. Підготовка вугільної шихти до коксування в умовах комплексу коксових батарей №5,6 КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ». / Н.В. Мукіна, О.П. Черноусова, Д.В. Мірошніченко, Н.А. Десна, О.В. Ситник, В.В. Коваль // *Вуглехімічний журнал*. – 2021. – № 3. – С. 8 - 20. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2021-0-3-8-20>.
9. ПТЕ-2017 Правила технічної експлуатації коксохімічних підприємств. – Харків: ДП «Гипрококс», 2018. – 283 с.
10. Шульга І.В. Основи технології коксування вугілля [електронний ресурс] / І.В. Шульга, Д.В. Мірошніченко, О.В. Богоявленська. – Харків – Тернопіль: Видавництво «Крок», 2022. – 120 с.
11. Довідник коксохіміка. Т. 2. *Виробництво коксу* [За ред. В.І. Рудики, Ю.Є. Зінгермана]. – Харків: ВД ІНЖЕК, 2014. – 728 с.
12. Шульга І.В. Розрахунок і проектування устаткування вуглепідготовчих і коксових цехів / І.В. Шульга, Д.В. Мірошніченко. – Харків: Планета-Прінт, 2020. – 319 с.
13. Гончаров В.І. Розробка раціональних технологічних параметрів обігріву коксової батареї з трамбуванням вугільної шихти / В.І. Гончаров, І.І. Сікан, Я.І. Дячук, Н.В. Мукіна, І.В. Шульга // *Вуглехімічний журнал*. – 2021. – № 3. – С. 20-29. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2021-0-3-20-29>
14. Філатов Ю.В. Теорія та практика виробництва та застосування доменного коксу покращеної якості / Ю.В. Філатов, Є.Т. Ковальов, І.В. Шульга [та ін.]. – К.: *Наукова думка*, 2011. – 128 с.
15. Ярошевський С.Л. Ресурсозберігаючі технології металургійного виробництва на основі використання українського вугілля / С.Л. Ярошевський, А.В. Ємченко, І.В. Шульга [та ін.]. – Харків: Контраст, 2012. – 204 с.
16. Ємченко А.В. Методичні рекомендації з виробництва доменного коксу поліпшеної якості А.В. Ємченко, Є.Т. Ковальов, О.І. Коломійченко [та ін.]. – Харків: ДП «УХІН», 2011. – 20 с.
17. Рудика В.І. Державному підприємству «Державний інститут із проектування підприємств коксохімічної промисловості (ДП «ГІПРОКОКС») – 90 років / В.І. Рудика // *Вуглехімічний журнал*. – 2019. – № 3. – С. 3-5.
18. ДСТУ 4370: 2011. Енергозбереження. Коксохімічне виробництво. Ресурси енергетичні вторинні. Методика визначення показників виходу і використання / Розр.: Є.Т. Ковальов, І.В. Шульга. – Київ: Держспоживстандарт, 2011. – 96 с.
19. Мукіна Н.В. Скорочена методика розрахунку технічно обґрунтованих витрат тепла на коксування трамбованих шихт / Н.В. Мукіна, І.В. Шульга. – Кривий Ріг: ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», 2019. – 8 с.
20. Шульга І.В. Методика розрахункового визначення середньозважених показників нижчої теплотворної здатності коксохімічної продукції / І.В. Шульга, Д.В. Мірошніченко, Я.С. Балаєва. – Харків: УХІН, 2011. – 17 с.
21. Торяник Е.І. Розробка рекомендацій щодо оптимальної витрати тепла на коксування з урахуванням складу вугільних шихт та технологічних режимів коксування / Звіт про НДР № 96.2002. Держ. реєстр. № 0102U00492 / Е.І. Торяник, І.В. Шульга. – Харків: УХІН, 2002. – 62 с.

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-4-26-37

Speciality G1. U.D.C.: 662.749.2:662.741.3

OPTIMISATION OF THE COAL BLEND TAMPING PROCESS AND HEATING REGIMES FOR COKING CHAMBERS AT THE COKING PLANT OF PJSC 'ARSEALORMITTAL KRYVYI RIH'© M.V. Galushkin¹, A.O. Kolupayko²

PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih", 50095, Kryvyi Rih, Krivorozhstal st., 1, Ukraine

O.V. Sytnik³, O.L. Borysenko⁴, I.V. Shulga⁵

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

¹ Mykola Volodymyrovych Galushkin, Director for Coke-chemical Production and Energetics, ORCID: 0009-0004-7465-3351, e-mail: Nikolay.Galushkin@arcelormittal.com² Anatoliy Oleksandrovykh Kolupayko, Head of Coking Shop No. 1 of Coke and By-Product Plant, ORCID: 0009-0001-0320-7440, e-mail: anatoliy.kolupayko@arcelormittal.com³ Oleksiy Volodymyrovych Sytnyk, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of Coking Department (CD), ORCID: 0009-0006-2544-4275, Scopus ID: 37125125000, e-mail: aleksejsytnik48@gmail.com⁴ Oleksandr Lyudvikovich Borysenko, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Research Fellow, Deputy Director for Research and Research Quality Management, ORCID: 0000-0002-3842-9158, Scopus ID: 36805525000, e-mail: zd@ukhin.org.ua

⁵ Igor Volodymyrovych Shulga, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Research Fellow, Head of CD, ORCID: 0009-0007-8677-9180, Scopus ID: 59473856500, e-mail: ko@ukhin.org.ua

It has been shown that the tamped-charge coking technology was developed with the aim of expanding the raw material base for coke-chemical production and improving the efficiency of coal resource utilisation. Its implementation has made it possible to utilise significant volumes of low-coking-grade and fine-grained coal in the coking process, which are unsuitable for traditional bulk charging technology in coke ovens. Thanks to the pre-compaction of the blend, a stable coal cake is formed, which facilitates a uniform coking process and the production of coke with high strength characteristics.

As a result of Russian aggression, problems have arisen with the coal supply base for coking, forcing the company to reorient its raw material sources and, instead of low-caking coal, introduce coal concentrates into the blend, normally used in conventional top- charging coke production.

Irregularities in the supply of coal concentrates and fluctuations in their grade composition compelled the plant's staff, in collaboration with the team at the the State Enterprise "Ukrainian State Research Institute for Carbochemistry (UKHIN)", to carry out regular studies of coal characteristics and to develop optimal blend compositions for producing coke using the tamping process. Thus, for the first time, significant quantities of gas coal, coking coal and fat coal – which differ considerably in terms of their tampability – began to be introduced into the tamping charge. To prevent the coal cake from collapsing, the plant's workforce, drawing on their many years of experience and professionalism, developed improved software recipes governing the tamping process in the tamping-loading-pushing machine (RLPM). These programmes make it possible to compact the charge even when its composition changes, thereby adjusting the energy consumption required for this process.

This article presents a calculation of the optimal heating regime for coking chambers, aimed at reducing coke oven gas consumption for heating and ensuring stable coking process conditions, which ultimately contributes to the production of high-quality finished coke with minimal energy consumption.

Keywords coke, coal blend, tamped-charge coking technology, coal cake, strength, density, tamping ability, heating regime, coke oven gas.

Corresponding author: O.V. Sytnik, e-mail: aleksejsytnik48@gmail.com

Manuscript received 2026-04-01

Accepted for publication 2026-07-01

Published 2026-07-22

This article is licensed under a CC BY 4.0 license

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-4-37-43

Спеціальність G1. УДК 665.761.6; 662.73

ПРОМИСЛОВИЙ ДОСВІД ВВЕДЕННЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЮ ТРУБЧАСТОЇ ПЕЧІ ДЛЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО НАГРІВАННЯ ПОГЛІНАЛЬНОЇ ОЛИВИ

© В.О. Кузнецов¹, Р.В. Каренов², С.М. Солонько³, Ю.І. Гасвський⁴

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

Л.П. Банніков⁵

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

¹ Кузнецов Валерій Олександрович, головний інженер, ORCID: 0009-0007-1539-2819, e-mail: Valeriy.Kuznecov@arcelormittal.com

² Каренов Роман В'ячеславович, начальник цеху уловлювання та сіркоочищення (ЦУСО), ORCID: 0009-0007-1868-3929, e-mail: Roman.Karenov@arcelormittal.com



³ Солонько Сергій Миколайович, заступник начальника ЦУСО з технології коксохімічного виробництва, ORCID: 0009-0004-1173-3303, e-mail: sergey.n.solonko@arcelormittal.com

⁴ Гаєвський Юрій Іванович, заступник начальника ЦУСО, ORCID: 0009-0007-2417-0628, e-mail: yuriy.gaevskiy@arcelormittal.com

⁵ Банніков Леонід Петрович, докт. техн. наук, ст. досл., зав. хімічного відділу, ORCID: 0000-0001-5835-2568, e-mail: ukhinbannikov@gmail.com

Стаття присвячена підвищенню енергоефективності бензолового відділення цеху уловлювання хімічних продуктів коксування КХВ ПАТ «АМКР». Показано, що ведення в експлуатацію у червні 2025 року нової трубчастої печі за технологією компанії Krupp Koppers дозволило модернізувати стадію дистиляції та стабілізувати теплотехнічні параметри. Завдяки радіаційно-конвективній схемі печі та спалюванню зворотного коксового газу забезпечено рівномірний розподіл теплових потоків. Це виключило локальні перегіви змішувачів, знизило термічне коксоутворення в оливі та попередило забивання апаратури коксом, що збільшило її міжремонтний період. На основі розрахунків обґрунтовано, що для зниження втрат бензолових вуглеводнів до 3 г/м^3 необхідна витрата оливи не менше $147 \text{ м}^3/\text{год}$. Шляхом реконфігурації насосів циркуляцію абсорбенту на скрубери та колону фактично збільшено до $170 \text{ м}^3/\text{год}$. У ході супутніх ремонтів усунуто руйнування полотна двох нижніх тарілок дистиляційної колони. Очищення оливоохолоджувачів від кристалічних відкладень антрацену та заміна ущільнень дефлегматорів на паронітові дозволили чітко регулювати витрату пари й стабілізувати температуру нагрівання оливи перед колоною в межах оптимальних $155\text{--}165^\circ\text{C}$. Реалізація комплексу ремонтних робіт забезпечила нормалізацію теплового балансу системи та оптимізацію температурного градієнта десорбції; при цьому різниця температур між багатою (вхідною) та частково знебензоленою (вихідною) поглинальною оливою зросла до оптимальних $10\text{--}15^\circ\text{C}$, що безпосередньо свідчить про високу інтенсивність випаровування вилучених бензолових вуглеводнів. Впровадження комплексу заходів дозволило повністю нормалізувати технологічний режим та знизити втрати бензольних вуглеводнів у коксовому газі нижче проектного рівня – 3 г/м^3 .

Ключові слова: очищення коксового газу, бензолові вуглеводні, поглинальна олива, трубчаста піч, радіаційно-конвективний теплообмін, десорбція, коксоутворення, коксовий газ.

Автор для листування В.О. Кузнецов, e-mail: Valeriy.Kuznecov@arcelormittal.com

Рукопис надійшов до редакції 05.05.2026

Прийнято до публікації 01.07.2026

Опубліковано 22.07.2026

Ця стаття ліцензується відповідно до міжнародної ліцензії CC BY 4.0

Оптимізація технологічних процесів у сучасній хімічній промисловості тісно пов'язана з підвищенням енергоефективності теплообмінного обладнання та забезпеченням точних температурних режимів. Сучасні тенденції розвитку галузі вимагають впровадження високоінтенсивного обладнання, здатного працювати в безперервному режимі з мінімальними питомими витратами енергоносіїв. Саме температурний діапазон $150\text{--}170^\circ\text{C}$, що стабільно підтримується в трубчастій печі, є оптимальним для досягнення максимальної ефективності експлуатації бензольного відділення [1, 2].

До початку модернізації у бензоловому відділенні КХВ ПАТ «АМКР» експлуатувалася трубчаста піч, введена в дію у 1983 році. За понад 35 років безперервної експлуатації агрегат зазнав значного фізичного та морального зносу, що негативно позначилося на стабільності технологічного режиму та ефективності процесів вилучення бензольних вуглеводнів з коксового газу. У березні 2019 року підприємством було офіційно оголошено про реалізацію масштабної реконструкції зазначеного технологічного вузла. Додатковим фактором, що ускладнював роботу бензолового відділення, був незадовільний температурний режим абсорбції, обумовлений надходженням поглинальної оливи на бензоловий скрублер з підвищеною температурою. Підвищення температури контакту фаз у системі «газ–рідина» призводило до зміщення термодинамічної рівноваги у бік десорбції бензольних вуглеводнів, наслідком чого ставали їх підвищені втрати зі зворотним коксовим газом.

Недостатня ефективність очищення коксового газу визначалася комплексною дією кількох взаємопов'язаних чинників [3, 4]. По-перше, спостерігалася нестабільна робота бензолової колони, що супроводжувалося коливаннями параметрів теплоносіїв, нестійким тиском у кубовій частині та погіршенням чіткості ректифікації. По-друге, неоптимальний температурний профіль процесу абсорбції, зокрема підвищена температура безпосереднього кон-

такту коксового газу з поглинальною оливою у бензолі в скрубєрі, сприяв зниженню ефективності вилучення бензольних вуглеводнів. Третім фактором був режим зрошення скрубєра: незважаючи на те, що питома витрата оливи перебувала на рівні технологічного регламенту (1,8–2,0 л/м³ газу), фактичний об'єм циркуляційної оливи виявився недостатнім для компенсації температурних та дистиляційних відхилень технологічного процесу.

Введення в експлуатацію нової трубчастої печі та відновлення роботи бензолі в відділенні черги №2 у червні 2025 року після тривалого простою зумовили необхідність проведення комплексного науково-технічного аналізу функціонування системи вилучення бензольних вуглеводнів. Основними завданнями дослідження стали оптимізація процесів абсорбції бензольних вуглеводнів із коксового газу, відновлення систематичного контролю корозійної агресивності поглинальної оливи, а також оцінка її коксоутворюючої здатності з метою попередження забивання теплообмінної та масообмінної апаратури [5, 6].



Рис. 1 Нова трубчаста піч бензолі в відділенні з димовою трубою

Нова трубчаста піч, розроблена за технологією компанії Krupp Corpers (рис. 1), являє собою сучасний високоефективний комплекс вогневого нагріву, адаптований до вимог сучасного коксохімічного виробництва. Впровадження даної установки дозволило модернізувати стадію дистиляції в бензолі в відділенні та підвищити стабільність теплотехнічних параметрів процесу.

Ключовою конструктивною особливістю печі Krupp Corpers є використання радіаційно-конвективної схеми теплообміну. Нагрівання кам'яновугільної поглинальної оливи здійснюється в трубчастих зміювиках за рахунок спалювання очищеного зворотного коксового газу. Конструкція палинкових пристроїв і камери згоряння забезпечує рівномірний розподіл теплових потоків у зоні нагріву, що має принципове значення для запобігання локальним перегрівам поверхні труб. Завдяки цьому знижується інтенсивність термічного коксоутворення в робочій оливі, зменшується формування нагарових відкладень на внутрішніх поверхнях зміювиків та підвищується тривалість міжремонтного періоду експлуатації агрегату.

Досвід експлуатації бензолі в відділенні у пусковий період виявив низку взаємопов'язаних відхилень від стабільного технологічного режиму. Одним із ключових дестабілізуючих чинників стали значні коливання витрати та параметрів водяної пари, що подається безпосередньо на дистиляційну колону. Нестабільність подачі теплоносія спричиняла коливання тиску в кубовій частині колони та відповідні зміни температурного режиму у верхній зоні апарату. Порушення теплового й гідродинамічного режимів дистиляції негативно вплинуло на якість кінцевих продуктів процесу. Зокрема, вміст фракції відгону до 180 °C у сирому бензолі епізодично знижувався нижче нормативного рівня, тоді як ступінь знебензолювання поглинальної оливи залишалась недостатньою.

Новий технологічний комплекс трубчастої печі передбачав не лише заміну вогневого агрегату, а й комплексну реконструкцію супутньої технологічної інфраструктури. Паливна система була адаптована для використання очищеного коксового газу як основного палива, що забезпечило ефективну утилізацію вторинних енергетичних ресурсів підприємства. Одночасно було виконано демонтаж застарілих ділянок газопроводів і оливопроводів, а також модернізовано насосне обладнання системи циркуляції поглинальної оливи.

На відміну від попередньої конструкції, нова трубчаста піч оснащена сучасною автоматизованою системою контролю процесу горіння, яка передбачає блокування палинкових пристроїв у разі перепадів тиску або згасання полум'я. Крім того, система обладнана датчиками контролю температури зміювиків та економайзерів, що дозволяє мінімізувати ризики локального перегріву й термічного коксування компонентів оливи всередині труб. За проектними екологічними показниками модернізація даного вузла мала забезпечити зниження прямих викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Реалізація проекту супроводжувалася суттєвими корективами графіка виконання робіт, зумовленими впливом зовнішніх макроекономічних і безпекових чинників, зокрема пандемією COVID-19, воєнними

діями та дефіцитом електроенергії в енергосистемі України. Зазначені обставини призводили до періодичного обмеження або тимчасової консервації окремих виробничих потужностей комбінату. У результаті фактичне введення в експлуатацію модернізованого бензолowego відділення у складі черги №2 відбулося лише у червні 2025 року.

Перехід від тривалого простою до гарячого пуску технологічного комплексу в літній період закономірно супроводжувався етапом налагодження теплових і гідродинамічних режимів. Подібний характер пускових

операцій є типовим для об'єктів коксохімічного виробництва такого масштабу та потребує поступової стабілізації параметрів масо- і теплообміну в основних технологічних апаратах [7, 8].

На основі виконаних розрахунків визначено першочергові заходи щодо зниження втрат бензолowych вуглеводнів із коксовим газом. Аналіз показав суттєву залежність величини втрат від температурного режиму роботи бензолowego відділення. На рис. 2 наведено залежність втрат бензолowych вуглеводнів з очищеним коксовим газом від температури.

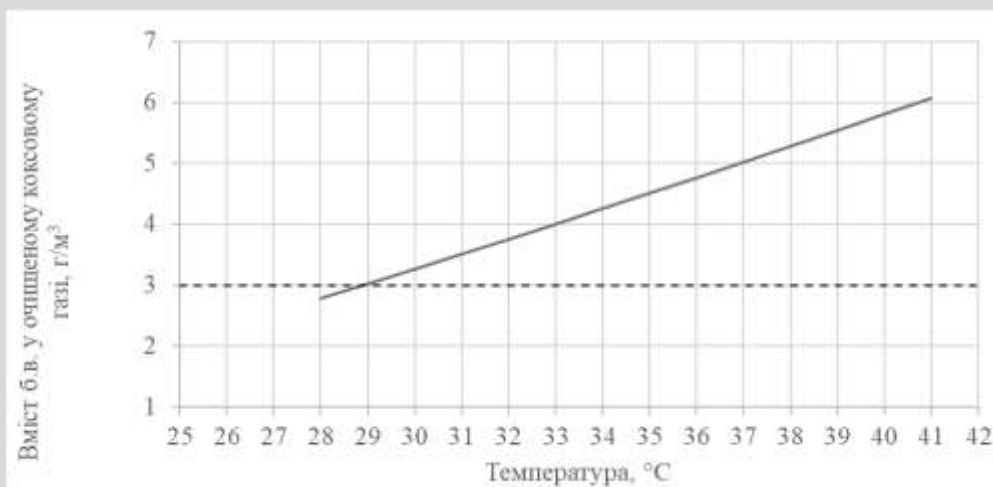


Рис. 2 Втрати бензолowych вуглеводнів з коксовим газом в залежності від температури за умови поточного технологічного режиму, (витрата пари у колону збільшена до 2,75 т/год)

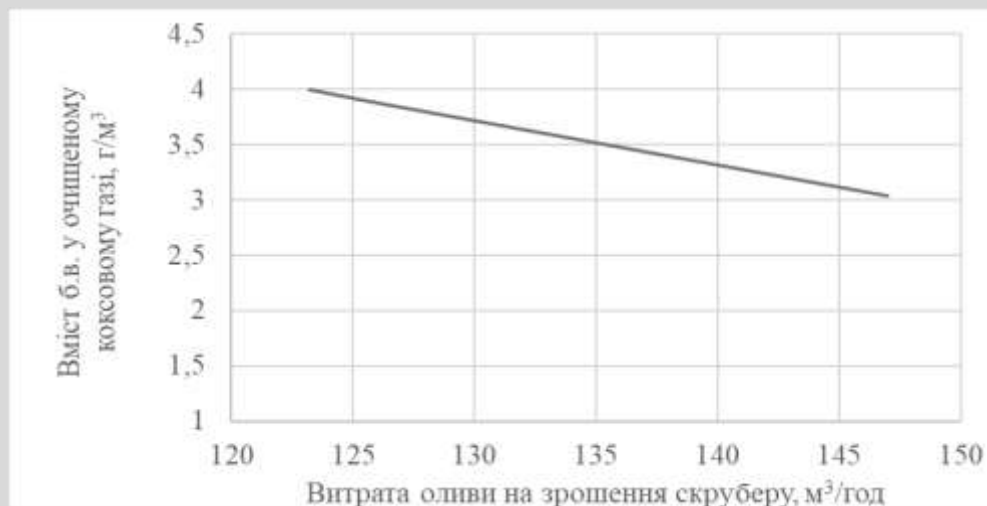


Рис. 3 Втрати бензолowych вуглеводнів з коксовим газом в залежності від кількості оливи (витрата оливи у колону збільшена до 2,75 т/год, температура поглинальної оливи у скрубери – 33 °C)

Розрахунок показав, що лише зниження температури у верхній частині скрубера до 29 °С в існуючих умовах дозволяє зменшити втрати бензолових вуглеводнів до 3,0 г/м³ коксового газу. Проте досягнення такого температурного рівня у виробничих умовах є складним через обмеження системи охолодження та сезонні коливання температури оборотної води. У зв'язку з цим було проведено додатковий розрахунок для температури 33 °С за умови підвищення витрати поглинальної оливи, що подається на зрошення скрубера. На рис. 3 наведено залежність втрат бензолових вуглеводнів коксового газу від кількості оливи, що подається на зрошення скрубера.

Розрахунок показав, що збільшення витрати поглинальної оливи до 147 м³/год дозволяє досягти значення 3,0 г/м³ бензолових вуглеводнів у очищеному коксовому газі. На основі проведеного технічним відділом підприємства і керівництвом цеха уловлювання аналізу режимних показників та стану обладнання бензолового відділення у період пуску було виконано ряд ремонтних робіт. Ревізія та огляд дистиляційної колони показав наявність руйнувань двох нижніх тарілок (деяких сегментів полотна), що порушувало масообмін поглинальної оливи. Усунення пошкоджень дозволило відновити режим роботи перших тарілок колони, де відбувається доочищення від бензольних вуглеводнів частково знебензоленої оливи.

Для відновлення температурного режиму абсорбції бензолових вуглеводнів з коксового газу виконана ревізія та відновлювальні роботи холодильників оливи. З боку руху поглинальної оливи виявлено нещільні осади, які представляють собою кристали ароматичних сполук оливи, за зовнішнім видом нагадуючи кристали антраценової фракції. З боку оборотної води значних відкладень не спостерігалось. Ущільнення холодильника оливи були замінені на паронітові прокладки. Була виконана чистка і заміна ущільнень водяного і оливного дефлегматорів, що дозволяє контролювати витрату водяної пари на відпарювання оливи у більш ширшому діапазоні. Параметри роботи насосного обладнання також було відкориговано для збільшення циркуляції оливи.

Якість поглинальної оливи, що надходить на поповнення циклу у бензольне відділення, характеризувалася низьким вмістом фенолів і нафталіну, низькою густиною, задовільним фракційним складом (відсутність фракцій з температурою кипіння менше 230 та вище 300 °С). В процесі роботи олива загущувалася до 1065-1075 кг/м³, при цьому доволі високий вміст нафталіну у робочій оливі 7-8 % дозволяє характеризувати оливу як задовільну. Але тенденція до зниження вмісту нафталіну нижче 7 % та загущення оливи, що намічається, в майбутньому потребує корегування (стабільна робота

регенератора та пониження вмісту відгону до 180 °С у сирому бензолі) [9, 10].

Виконані ремонтні роботи призвели до нормалізації температурного режиму процесу. Серед значних позитивних змін слід відзначити наступні:

- збільшення витрати циркулюючої поглинальної оливи на зрошення скрубера та дистиляційної колони до 170 м³/год;

- стабілізація температури нагріву оливи перед колоною на рівні 155-165 °С;

- стабілізація різниці температур між входом та виходом оливи з колони (падіння температури на 10-15 °С свідчить про випаровування бензолових вуглеводнів).

Виконані заходи дозволили знизити втрати до проектного концентрації бензольних вуглеводнів у коксовому газі – нижче 3 г/м³.

Висновки

1. Проведення комплексних відновлювальних робіт на теплообмінній апаратурі дозволило суттєво інтенсифікувати теплообмінні процеси в системі. Було досягнуто стабілізації температури нагрівання оливи перед колоною в оптимальному діапазоні 155–165 °С. Виконані заходи забезпечили чітке регулювання витрати водяної пари на відпарювання у розширеному інтервалі параметрів та дозволили стабілізувати температурний градієнт по висоті колони, де падіння температури на 10–15 °С безпосередньо підтверджує інтенсивний процес випаровування бензолових вуглеводнів.

2. На основі проведених розрахунків встановлено, що для досягнення цільової концентрації бензолових вуглеводнів у очищеному коксовому газі необхідне збільшення витрати поглинальної оливи до 147 м³/год. У промислових умовах у результаті реконфігурації та корегування параметрів роботи насосного обладнання фактичну витрату циркулюючої оливи на зрошення скрубера та дистиляційної колони було успішно доведено до 170 м³/год.

3. Реалізація розробленого комплексу ремонтних та технологічних заходів дозволила повністю нормалізувати температурно-гідродинамічний режим бензолового відділення цеху уловлювання та забезпечити стабільне зниження залишкового вмісту бензолових вуглеводнів у очищеному коксовому газі до нормативного (проектного) рівня – нижче 3 г/м³.

Бібліографічний список

1. Уловлювання та переробка хімічних продуктів коксування. Том 3. [Довідник коксохіміка. У 6-ти томах.] / За заг. ред. Є.Т. Ковальова. – Харків: Видавничий Дім «ІНЖЕК», 2009. – 450 с.
2. Bannikov L. P. Evaluation of the effect of resin forming components on the quality of wash oil for benzene

recovery from coke oven gas / L. P. Bannikov, D. V. Miroshnichenko, A. L. Bannikov // *Petroleum and Coal*. – 2023. – Vol. 65(2). – P. 387–399.

3. Сікан І. І. Зниження корозійної активності робочої вбирної оливи у бензолному відділенні КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» / І. І. Сікан, Р. В. Каренов, Н. В. Мукіна, С. В. Солонько, Л. П. Банніков // *Вуглехімічний журнал*. – 2021. – № 3. – С. 29–37.

4. Романюк І. В. Аналіз та шляхи зниження витрати поглинального оливи на вилучення бензолних вуглеводнів з коксового газу / І. В. Романюк, Ю. Н. Скрипій, І. А. Клемін, Н. В. Мукіна, Л. П. Банніков // *Вуглехімічний журнал*. – 2016. – № 4. – С. 10–15.

5. Miroshnichenko D. Composition and polymerisation products influence on the viscosity of coal tar wash oil / D. Miroshnichenko, A. Bannikov, L. Bannikov, O. Borisenko // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14(1). – P. 27322–27336. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76434-6>.

6. Miroshnichenko D. Impact of Wash Oil Composition on Degradation: A Comparative Analysis of “Light” and “Heavy” Oils / D. Miroshnichenko, A. Bannikov, L. Bannikov, O. Borisenko, A. Shishkin, P. Gavrilovs, V.

Tertychnyi // *Resources*. – 2025. – Vol. 14(5). – Art. 5. <https://doi.org/10.3390/resources14010005>.

7. Лаврова І. О. Порівняльна оцінка різних технологічних установок для абсорбції бензолних вуглеводнів з коксового газу / І. О. Лаврова, В. І. Шустіков, О. І. Лавров // *Вуглехімічний журнал*. – 2000. – № 3–4. – С. 36–40.

8. Лаврова І. О. Ресурсо- та енергозбереження при отриманні сирого бензолу з коксового газу / І. О. Лаврова, О. І. Лавров // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2006. – № 4. – С. 12–18.

9. Miroshnichenko D. Kinetic analysis and comparison of the coking behavior of coal tar oil / D. Miroshnichenko, L. Bannikov, O. Borisenko, E. Rudneva, V. Tertychnyi // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – P. 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12119-y>.

10. Miroshnichenko D. Absorption oil for coke oven gas purification / D. Miroshnichenko, L. Bannikov, A. Bannikov, S. Nesterenko, F. Cheshko, S. Kravchenko // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2025. – Vol. 60(1). – P. 95–102. <https://doi.org/10.59957/jctm.v60.i1.2025.9>.

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-4-37-43

Specialty G1. U.D.C.: 665.761.6; 662.73

INDUSTRIAL EXPERIENCE IN STARTING UP A TUBULAR FURNACE FOR HIGH-EFFICIENCY HEATING OF ABSORBENT OIL

© V.O. Kuznecov¹, R.V. Karenov², S.M. Solonko³, Yu.I. Gaevskiy⁴

Coke and By-Product Plant of PJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”, 50095, Kryvyi Rih, Krivorozhstal st., 1, Ukraine

L.P. Bannikov⁵

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

¹ Valery Olexandrovych Kuznetsov, Chief Engineer, ORCID: 0009-0007-1539-2819, e-mail: Valeriy.Kuznecov@arcelormittal.com

² Roman Vyacheslavovych Karenov, Head of Recovery Shop (RSh), ORCID: 0009-0007-1868-3929, e-mail: Roman.Karenov@arcelormittal.com

³ Serhiy Mykolayovych Solonko, Deputy Head of RSh for Technology, ORCID: 0009-0004-1173-3303, e-mail: sergey.n.solonko@arcelormittal.com

⁴ Yuriy Ivanovich Gaevskiy, Deputy Head of RSh, ORCID: 0009-0007-2417-0628, e-mail: yuriy.gaevskiy@arcelormittal.com

⁵ Leonid Petrovich Bannikov, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Chemical Department, ORCID: 0000-0001-5835-2568, e-mail: ukhinbannikov@gmail.com

The start-up of a new tube furnace based on Krupp Koppers technology in June 2025 enabled the modernization of the distillation stage and the stabilization of thermal parameters. Thanks to the furnace's radiation-convection design and the combustion of coke oven gas, uniform distribution of heat fluxes is ensured. This eliminated local overheating of the coils, reduced thermal coking in the oil, and prevented equipment clogging with carbon deposits, thereby extending the time between maintenance intervals. Calculations have shown that an oil flow rate of at least 147 m³/h is required to reduce benzene hydrocarbon losses to 3 g/m³. By reconfiguring the pumps, the absorbent circulation to the scrubbers and the column was effectively increased to 170 m³/h. During the accompanying repairs, damage to the linings of the two lower trays of the distillation column was repaired. Cleaning the oil coolers of crystalline anthracene deposits and replacing

the dephlegmator seals with paronite ones allowed for precise regulation of steam flow and stabilization of the oil heating temperature upstream of the column within the optimal range of 155–165 °C. The implementation of this set of repair works ensured the normalization of the system's heat balance and the optimization of the desorption temperature gradient; at the same time, the temperature difference between the rich (inlet) and partially benzene-stripped (outlet) absorbent oil increased to the optimal range of 10–15 °C, which directly indicates the high evaporation intensity of the removed benzene hydrocarbons. The implementation of a set of measures made it possible to fully normalize the operating conditions and reduce benzene hydrocarbon losses in coke oven gas to below the design level of 3 g/m³.

Keywords: coking, coke oven gas purification, benzene hydrocarbons, absorption oil, tube furnace, radiative-convective heat transfer, desorption.

Corresponding author: V.O. Kuznecov, e-mail: Valeriy.Kuznecov@arcelormittal.com

Manuscript received 2026-05-05

Accepted for publication 2026-07-01

Published 2026-07-22

This article is licensed under a CC BY 4.0 license

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-4-43-48

Спеціальність G1. УДК 66.092.89:66.074.371

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ СІРЧАНИХ СКРУБЕРІВ У ПРОЦЕСАХ ОЧИЩЕННЯ КОКСОВОГО ГАЗУ

© О.В. Черногоров¹, Д.В. Красніков²

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

К.О. Дорошенко³, А.Л. Банніков⁴

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

¹ Черногоров Володимир Олександрович, головний енергетик, ORCID: 0009-0001-2694-4363, e-mail: vladimir.chernogorov@arcelormittal.com

² Красніков Денис В'ячеславович, заст. нач. цеху уловлювання та сіркоочищення, ORCID: 0009-0005-9078-7947, e-mail denis.krasnikov@arcelormittal.com

³ Дорошенко Кристина Олександрівна, в.о. наук. співр. хімічного відділу, ORCID: 0009-0005-1683-4346, e-mail: ho@ukhin.org.ua

⁴ Банніков Артем Леонідович, Ph.D. (техн. науки), в.о. наук. співр. відділу аналітичних досліджень, стандартизації, метрології та екології, ORCID: 0000-0003-4579-4396, e-mail: artiksmartik@gmail.com

У статті проведено ретроспективний та порівняльний аналіз застосування різних типів внутрішньо-апаратних пристроїв (насадок та тарілок) у скруберах сіркоочищення коксохімічних підприємств. Розглянуто досвід розробки та впровадження вітчизняних технологічних рішень, а також використання сучасних регулярних насадок світових виробників. Наведено промислові показники роботи скрубєрів тарілкового типу та окреслено проблеми їхньої експлуатації.

Також у роботі наведено результати модернізації установки сіркоочищення коксового газу, виконаної у 2025 році, спрямованої на підвищення ефективності процесів абсорбції та регенерації розчинів. Основну увагу приділено реконструкції сірчаного скрубєра № 3, в якому було демонтовано зруйновані насадочні шари, що спричиняли підвищений гідравлічний опір і нерівномірний розподіл газорідного потоку. Як заміну застосовано металеві кільця Рашига збільшеного діаметра 52–57 мм, виготовлені в умовах підприємства, що дозволило швидко відновити працездатність апарата та забезпечити прийнятні гідродинамічні характеристики. Після введення скрубєра в експлуатацію при продуктивності 100 тис. м³/год встановлено стабільний гідравлічний опір не більше 130 мм вод. ст., що відповідає розрахунковим значенням. Додатково реалізовано регулювання зрошення по шарах насадки, що підвищило гнучкість роботи абсорбційної системи. Проведено також заміну компаблків у регенераційному тракту, що усунуло обмеження пропускної здатності парогазової

суміші, відновило ефективне охолодження та стабілізувало вакуумну систему. В результаті виконаних заходів досягнуто глибокого очищення коксового газу від сірководню до рівня менше 0,5 г/м³ та підвищено виробництво сірчаної кислоти, що підтверджує ефективність реалізованих технічних рішень.

Ключові слова: коксохімічне виробництво, коксовий газ, сіркоочищення, абсорбер, регулярна насадка, крупнодірчасті тарілки, гідравлічний опір.

Автор для листування Д.В. Красніков, e-mail: denis.krasnikov@arcelormittal.com

Рукопис надійшов до редакції 03.05.2026

Прийнято до публікації 01.07.2026

Опубліковано 22.07.2026 Ця стаття ліцензується відповідно до міжнародної ліцензії CC BY 4.0

Очищення коксового газу від сірководню (H₂S) є одним із ключових завдань коксохімічного виробництва, що зумовлено як суворими екологічними вимогами, так і необхідністю захисту газотранспортних систем від корозії. Яскравим прикладом реалізації таких завдань у промислових масштабах України є масштабні екологічні заходи ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (ПАТ «АМКР»). В межах міських та регіональних природоохоронних програм підприємство провело глибоку екомодернізацію цеху сіркоочищення, вивівши з експлуатації застарілі коксові батареї №1 і №2 та перенаправивши потоки газу на сучасні, екологічніші комплекси батарей №5 і №6. Проведена ревізія скрубєрних систем, заміна теплообмінного обладнання та стабілізація процесу уловлювання H₂S дозволили комбінату забезпечити залишкову концентрацію сірководню у викидах на нормативному рівні (менше 0,5 г/м³), утилізуючи його з подальшим виробництвом технічної сірчаної кислоти.

Ефективність процесу абсорбції сірководню безпосередньо залежить від конструкції внутрішньоапаратних пристроїв скрубєрів, які повинні забезпечувати максимальний розвиток поверхні фазового контакту при одночасному мінімальному гідравлічному опорі та високій стабільності роботи колони [1]. Специфіка очищення коксового газу висуває жорсткі вимоги до гідродинамічних характеристик масообмінного обладнання, що зумовлено передусім низьким робочим тиском газу, який найчастіше є близьким до атмосферного [2]. Через це допустимий перепад тиску в абсорбері є жорстко обмеженим, а перевищення критичного гідравлічного опору насадками чи тарілками призводить до зростання протитиску в системі, суттєвого збільшення енерговитрат на газодувні машини та виникнення ризику порушення гідрозатворів.

Додатково ситуація ускладнюється високим рівнем полідисперсних забруднень у газі, який надходить на сіркоочищення із залишками вугільного пилу, висококонденсованих смоляних туманів та парів нафталіну. У процесі охолодження газу та його безпосереднього контакту з поглинальним розчином ці компоненти утворюють липкі смоло-нафталінові відкладення, які швидко адсорбуються на твердих контактних поверхнях. Це викликає прогресуюче засмолення, забивання вільних перерізів насадочних тіл і, як наслідок, призводить до різкого падіння ефективності масообміну аж до повного захливання апарата [3]. З огляду на зазначені чинники, вибір внутрішніх пристроїв сірчаних скрубєрів завжди є складним інженерним компромісом між прагненням досягти максимально високої питомої поверхні контакту фаз для інтенсифікації масообміну та необхідністю зберегти достатню пропускну здатність й здатність апарата до самоочищення в такому агресивному та схильному до інкрустації середовищі.

На етапі проектування перших вітчизняних систем сіркоочищення базовим рішенням було використання дерев'яної хордової насадки. Такі пристрої характеризувалися значною металомісткістю (габаритами) та питомою площею поверхні в межах 0,5-0,6 м² на 1 м³ коксового газу. У 70-90-х роках ХХ століття за результатами комплексних досліджень Українського державного науково-дослідного вуглехімічного інституту (нині – ДП «УХІН») для процесів вакуум-карбонатного сіркоочищення було рекомендовано пласкопаралельну насадку. Вона дозволила оптимізувати питому поверхню до 0,22 м² на 1 м³ коксового газу. Залежно від об'ємної продуктивності апарата, висота насадки, еквівалентна одному теоретичному ступеню зміни концентрації (БЕП), для цієї конструкції становила 0,6 -1,5 м. Альтернативним підходом, що реалізовувався у світовій практиці (зокрема у схемах фірми Kühr Корпс), було проведення абсорбції під підвищеним тиском коксового газу (0,7 МПа). Для цього використовували триступеневі абсорбери висотою 25 м, де на першому ступені контакт фаз забезпечувався двома шарами насипної насадки з пропіленових кілець [4-8].

Сучасний етап модернізації коксохімічних потужностей України базується на переході до високоефективних регулярних (структурованих) насадок. Подальшим кроком в оптимізації цього проекту, після консультацій із провідними експертами фірми Sulzer Chemtech, стало рішення про застосування високотехнологічної регулярної насадки Sulzer MellapakPlus з гофрованого металевого листа. Оскільки коксовий газ подається на сіркоочищення під

низьким тиском, критично важливо мінімізувати перепад тиску ΔP в колоні. Регулярна структура Mellapak має великий вільний об'єм (до 95–97 %), що забезпечує вкрай низький опір сухої насадки. Навіть за інтенсивного зрошення опір на метр висоти шару залишається в рази меншим, ніж у насипних аналогів. Це знижує навантаження на нагнітачі (газодувні машини) та економить електроенергію [9].



Насадки типу Mellapak 250.Y або 350.Y забезпечують питому поверхню у 250–350 $\text{м}^2/\text{м}^3$. Для порівняння, плоскопаралельна насадка забезпечувала близько 160 $\text{м}^2/\text{м}^3$, а хордова – менше 1 $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Використання тарілчастих апаратів у процесах сіркоочищення є альтернативою насадочним колонам, яка часто впроваджується з метою зниження ризику забивання апарата відкладеннями смоли та нафталіну.

На двоступеневій установці сіркоочищення одного з українських підприємств експлуатувалися скрубери тарілчастого типу. Внутрішня структура апарата включала 15 тарілок провального типу, згрупованих у 3 пакети по 5 тарілок у кожному. Рівномірність початкового зрошення забезпечував змонтований над верхньою тарілкою спеціальний розподільник поглинального розчину. За продуктивності скрубера 100 $\text{м}^3/\text{год.}$ за коксовим газом його загальний гідравлічний опір утримувався на досить низькому рівні – 350 мм вод. ст.

Досвід роботи крупнодірчастих тарілчастих апаратів показав, що фактичні режими роботи скрубера суттєво відхилялися від проектних через нестабільність постачання коксового газу (від 47 до 98 тис. $\text{нм}^3/\text{год.}$), що безпосередньо впливало на швидкість газу в колоні

0,47–0,97 м/с та викликало значні коливання гідравлічного опору (від 20 до 153 мм вод. ст.). Тому при експлуатації необхідно було утримувати витрату поглинального розчину у дуже вузькому діапазоні, що призводило до завищення енергетичних витрат на перекачування розчину за умов роботи на знижених навантаженнях по газу [10].

Двоступенева установка вакуум-карбонатного сіркоочищення на ПРАТ «АМКР» була введена в експлуатацію у 2008 році. За чинною технологічною схемою, коксовий газ після бензольного відділення двома паралельними потоками надходить до цеху уловлювання, де послідовно проходить крізь скрубери першого та другого ступенів. Очищений після другого ступеня коксовий газ спрямовується споживачам для використання як енергетичне паливо. У процесі протиплинного руху знизу вгору крізь шар насадки скрубери коксовий газ промивається регенованим поглинальним розчином із загальною лужністю 30–40 г/л, який подається з відповідних ступенів регенератора.

Насичений поглинальний розчин після скрубера кожного ступеня уловлювання транспортується на відповідний ступінь регенерації. Таким чином, потоки поглинального розчину розділені на два автономні контури циркуляції. Контур першого ступеня охоплює два діючі послідовно з'єднані скрубери, насосну групу, систему теплообмінників, перший ступінь регенератора, проміжний резервуар, насос, а також послідовно встановлені теплообмінники, холодильники та безпосередньо скрубери першого ступеня. Контур другого ступеня функціонує за аналогічною замкненою схемою, що включає скрубери другого ступеня, насос, теплообмінне обладнання, другий ступінь регенератора, резервуар, насосну групу, теплообмінники, холодильники та повернення розчину в скрубери другого ступеня [11].

Технічні проекти основного технологічного обладнання цеху очищення коксового газу від сірководню, зокрема скрубери другого ступеня та регенераторів діаметром 5000 мм, а також циркуляційних підігрівачів, були розроблені ДП «ГІПРОКОКС». У сірчаному скрубери діаметром 5000 мм змонтовано п'ять ярусів насадки, виконаної з просічно-витяжного листа. Висока рівномірність початкового зрошення верхнього ярусу насадки поглинальним розчином досягається за допомогою спеціальної розподільної тарілки. З метою запобігання пристінковим ефектам та для перерозподілу потоків поглинального розчину по висоті колони над кожним ярусом насадки встановлено перерозподільні тарілки [12].

У період модернізації установки сіркоочищення (2025 р.) було виконано комплекс робіт, спрямованих на стабілізацію та підвищення ефективності процесів абсорбції й регенерації розчинів.

У сірчаному скрубєрі №3 демонтовано насадочні шари, що за час експлуатації практично зруйнувалися, спричинивши підвищений гідравлічний опір і нерівномірний розподіл газорідного потоку. Для забезпечення своєчасного введення апарату в роботу було необхідно у найкоротші строки виготовити нову насадку без залучення сторонніх виробників. Єдиним типом насадочних елементів, технологічно доступним для виготовлення на підприємстві, стали металеві кільця Рашига. З метою мінімізації гідравлічного опору обрано кільця збільшеного діаметра – 52–57 мм, що забезпечують прийнятне співвідношення площі змоченої поверхні та вільного перерізу для проходження коксового газу.



Конструкція заповнення скрубєра після реконструкції має наступний вигляд:

- перша секція (за напрямком руху коксового газу) заповнена лише горизонтально встановленою просічною металевою сіткою, укладеною на опорну решітку. Її функція – попереднє вирівнювання потоку коксового газу;

- друга, третя, четверта та п'ята секції містять насадочні шари з кілець Рашига висотою по 300 мм, кожен шар фіксований просічними сітками для запобігання зсуву під дією потоку;

- організовано додаткове зрошення п'ятого, четвертого та третього шарів регенерованим розчином для поліпшення масообмінних умов, стабілізації температурного режиму та запобігання нерівномірного зрошення верхніх зон насадки.

Після введення скрубєра №3 в експлуатацію та виходу на проектну продуктивність (100 тис. м³/год коксового газу) гідравлічний опір апарату становив не більше ніж 130 мм вод. ст., що практично відповідає

робочим параметрам для апаратів даного типу та свідчить про правильний вибір конструкції насадки і схеми зрошення.

Як опція, зрошення апарату функціонує при відкритих регулюючих пристроях на кожен шар насадки. При необхідності, в умовах недостатньої поверхні абсорбції для очищення, слід прикривати засувки на нижні шари зрошення, збільшуючи таким чином поверхню роботи регенерованого розчину другого ступеню.

Для збільшення подачі пари на регенерацію та стабілізації роботи тракту відведення сірководневого газу була проведена заміна компаблків — теплообмінних апаратів, що виконують функції конденсаторів холодильників. Їх призначення полягає у глибокому охолодженні парогазової суміші після регенераторів, відведенні барометричного конденсату та зменшенні навантаження парів на вакуум-насос.

Внаслідок корозії, зношування та забруднення внутрішніх каналів старі компаблкі працювали з низькою пропускною здатністю, що призводило до порушення руху парів, збільшення гідравлічного опору та погіршення умов регенерації розчину. Після їх заміни нормальна циркуляція парів через компаблкі була повністю відновлена. Це забезпечило ефективніше відокремлення конденсату, зниження температури газового потоку та стабілізацію вакууму в системі. Досягнуто високого ступеня очищення коксового газу від сірководню — аж до його вмісту в очищеному газі менше 0,5 г/м³, що супроводжується відповідним збільшенням виробництва сірчаної кислоти.

Висновки

1. У результаті модернізації установки сіркоочищення у 2025 р. забезпечено стабілізацію процесів абсорбції та регенерації розчинів, що позитивно вплинуло на ефективність очищення коксового газу.

2. Демонтаж зруйнованих насадочних шарів у сірчаному скрубєрі №3 та встановлення нової металевої насадки з кілець Рашига діаметром 52–57 мм дозволили знизити гідравлічний опір і забезпечити рівномірніший розподіл газорідного потоку.

3. Після введення скрубєра №3 в експлуатацію при продуктивності 100 тис. м³/год гідравлічний опір апарату не перевищував 130 мм вод. ст., що відповідає нормативним робочим параметрам і підтверджує правильність вибору конструкції насадки та схеми зрошення.

4. Передбачена можливість регулювання подачі зрошення по шарах насадки забезпечує додаткову гнучкість експлуатації апарату та дозволяє збільшувати ефективну поверхню контакту регенерованого розчину другого ступеня в умовах підвищеного навантаження.

5. Заміна компаблків регенераційного тракту сприяла відновленню нормальної циркуляції парогазової суміші, зниженню гідравлічного опору та стабілізації вакууму в системі.

6. Відновлення ефективного охолодження ком-паблоків та відведення барометричного конденсату покращило умови регенерації розчину й зменшило навантаження на вакуум-насосне обладнання.

7. У результаті виконаних заходів досягнуто високо-го ступеня очищення коксового газу від сірководню – менше 0,5 г/м³ в очищеному газі, що також забезпечило збільшення виробництва сірчаної кислоти.

Бібліографічний список

1. Borhani T. N. G. Modeling study on CO₂ and H₂S simultaneous removal using MDEA solution / T. N. G. Borhani, M. Afkhamipour, A. Azarpour, V. Akbari, S. H. Emadi, Z. A. Manan // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2016. – Vol. 34. – P. 344–355.
2. Park J. The comprehensive evaluation of available pilot-scale H₂S abatement process in a coke-oven gas: Efficiency, economic, energy, and environmental safety (4ES) / J. Park, S. Y. Lee, S. Lee, H. Oh, J. Kim, Y.-S. Yoon, I.-B. Lee, W. Um // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 9(6). – P. 106903. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106903>.
3. Банніков Л. П. Визначення розчинності смоли-стих компонентів коксового газу в робочих розчинах кругової сіроочищення / Л. П. Банніков, Н. П. Скрипче-нко, А. А. Пастернак // *Екологія та промисловість*. – 2017. – № 1. – С. 82–86.
4. Ковальов Є. Т. Дослідження і розробки ДП «УХІН» у галузі уловлювання та переробки хімічних продуктів коксування в сучасних умовах / Є. Т. Кова-льов, Л. П. Банніков, Ф. Ф. Чешко // *Вуглехімічний жу-рнал*. – 2020. – № 3. – С. 25–35. – <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2020-0-3-25-35>.
5. Ковальов Є. Т. Можливості вдосконалення техно-логічних процесів десульфуризації коксового газу та шляхи реконструкції установок в умовах зниження ресурсів сірководню / Є. Т. Ковальов, Л. П. Банніков, О. В. Похілько, В. А. Панасенко // *Вуглехімічний журнал*. – 2015. – № 4. – С. 30–36.
6. Zou H. Removal of hydrogen sulfide from coke oven gas by catalytic oxidative absorption in a rotating packed bed / H. Zou, M. Sheng, X. Sun, Z. Ding, M. Arowo, Y. Luo, L. Zhang, G. Chu, J.-F. Chen, B. Sun // *Fuel*. – 2017. – Vol. 204. – P. 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.017>.
7. Pan H.-J. Modeling of an integrated H₂S/NH₃ scrubber and regeneration columns for coke oven gas puri-fication / H.-J. Pan, M.-C. Fang, J. D. Ward, H.-Y. Lee, H.-Y. Lin, C.-T. Hsieh, C.-L. Lee, T.-H. Huang, Y.-C. Hsieh, S.-C. Lin, W.-T. Chou // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 389. – P. 136065. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136065>.
8. Mayer J. Dynamic and steady state simulation of coke oven gas purification / J. Mayer, R. Schneider, E. Kenig, A. Górak, G. Wozny // *Computers & Chemical Engineering*. – 1999. – Vol. 23, Supplement. – P. 843–846. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(99\)80207-5](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(99)80207-5).
9. Банніков Л. П. Оцінка експлуатаційної гнучкості основних технологічних процесів переробки коксового газу / Л. П. Банніков // *Вуглехімічний журнал*. – 2018. – № 1. – С. 49–55.
10. Шовкун В. Є. Цех сіроочищення ВАР «Ал-чевськкокс»: технічні можливості та перспектива / В. Є. Шовкун, Є. Т. Ковальов, Л. П. Банніков // *Вуглехімічний журнал*. – 2009. – № 3-4. – С. 74–78.
11. Білошапка І. В. Двоступінчаста вакуум-карбонатна сіроочищення коксового газу на підприєм-стві ВАР «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» / І. В. Бі-лошапка, І. І. Сікан, С. І. Зоря, Н. В. Мукіна, В. Л. П. Грабко, В. В. Грабко // *Вуглехімічний журнал*. – 2010. – № 1-2. – С. 55–61.
12. Грабко В. В. Особливості проектування двосту-пеневого очищення коксового газу від сірководню ва-куум-карбонатним методом / В. В. Грабко, А. Ф. Яр-мошик, В. М. Лі, С. І. Зоря // *Вуглехімічний журнал*. – 2009. – № 3-4. – С. 79–84.

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-4-43-48

Specialty G1. U.D.C.: 66.092.89:66.074.371

ANALYSIS OF THE DESIGN SOLUTIONS FOR SULFUR SCRUBBERS IN COKE OVEN GAS TREATMENT PROCESSES

© V.O. Chernogorov¹, D.V. Krasnikov²

Coke and By-Product Plant of PJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”, 50095, Kryvyi Rih, Krivorozhstal st., 1, Ukraine

K.O. Doroshenko³, A.L. Bannikov⁴

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

¹ Volodymyr Oleksandrovych Chernogorov, Chief Power Engineer, ORCID: 0009-0001-2694-4363, e-mail: vladimir.chernogorov@arcelormittal.com



² Denis Vyacheslavovich Krasnikov, Deputy Head of Recovery Shop, ORCID: 0009-0005-9078-7947, e-mail denis.krasnikov@arcelormittal.com

³ Doroshenko Kristina Olexadrivna, Acting Research Fellow of the Chemical Department, ORCID: 0009-0005-1683-4346, e-mail: xo@ukhin.org.ua

⁴ Artem Leonidovych Bannikov, Ph.D. in Technical Sciences, Acting Research Associate of Department of Analytical Research, Standardization, Metrology and Ecology, ORCID: 0000-0003-4579-4396, e-mail: artiksmartik@gmail.com

This article presents a retrospective and comparative analysis of the use of various types of internal devices (packing and trays) in sulfur scrubbers at coke chemical plants. It examines the experience of developing and implementing domestic technological solutions, as well as the use of modern structured fillers from global manufacturers. Industrial performance indicators for disc-type scrubbers are presented, and issues related to their operation are outlined. The paper presents the results of the modernization of the coke oven gas desulfurization unit, carried out in 2025, aimed at improving the efficiency of absorption and solution regeneration processes. The main focus is on the reconstruction of sulfur scrubber No. 3, in which the damaged packing layers were dismantled, as they caused increased hydraulic resistance and uneven distribution of the gas-liquid flow. As a replacement, metal Raschig rings with an increased diameter of 52–57 mm, manufactured in-house, were used, which allowed for the rapid restoration of the unit's operational capability and ensured acceptable hydrodynamic characteristics. After the scrubber was commissioned at a capacity of 100,000 m³/h, a stable hydraulic resistance of no more than 130 mm water column was established, which corresponds to the design values. Additionally, layer-by-layer irrigation control was implemented, which increased the operational flexibility of the absorption system. The compressor units in the regeneration line were also replaced, which eliminated the steam-gas mixture flow capacity limitation, restored effective cooling, and stabilized the vacuum system. As a result of these measures, deep purification of coke oven gas from hydrogen sulfide to a level below 0.5 g/m³ was achieved, and sulfuric acid production was increased, confirming the effectiveness of the implemented technical solutions.

Keywords: coke-chemical production, coke oven gas, desulfurization, absorber, fixed packing, large-aperture plates, hydraulic resistance.

Corresponding author D.V. Krasnikov, e-mail: denis.krasnikov@arcelormittal.com

Manuscript received 2026-05-03

Accepted for publication 2026-07-01

Published 2026-07-22

This article is licensed under a CC BY 4.0 license

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-4-48-56

Спеціальність: G1. УДК 542.1

РОЛЬ ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ У СИСТЕМІ АНАЛІТИЧНОГО КОНТРОЛЮ, СТАНДАРТИЗАЦІЇ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

© А.Ю. Мартинова¹, Н.М. Зеленська²

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

О.П. Солонько³

Коксохімічне виробництво ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", 50095, Дніпропетровська обл., м. Кривий Ріг, вул. Криворіжстали, 1, Україна

¹ Мартинова Алла Юріївна, канд. техн. наук, зав. відділом аналітичних досліджень, стандартизації, метрології та екології (ВАДСМ та Е), ORCID: 0009-0009-1288-7765, Scopus ID: 57203485255, e-mail: alla.martynova@aisim@ukr.net

² Зеленська Наталія Михайлівна, ст. наук. співр. ВАДСМ та Е, ORCID: 0009-0008-0327-5137, e-mail: aisim@ukhin.org.ua

³ Солонько Олена Петрівна, начальник центральної лабораторії технічного відділу КХВ, ORCID: 0009-0005-7811-7676, e-mail Olena.Solonko@arcelormittal.com

У статті розглянуто роль центральної лабораторії промислового підприємства у забезпеченні якості продукції на всіх етапах виробничого циклу – від вхідного контролю сировини до випробування готової продукції. Описано функції лабораторії як сучасного аналітичного центру, акредитованого відповідно до національних і міжнародних стандартів, а також її участь у впровадженні та застосуванні методик вимірювань і сертифікованих референтних матеріалів. Окрему увагу приділено питанню участі в програмах міжлабораторних порівнянь, внутрішнього контролю якості та співпраці з ДП «УХІН» у сфері стандартизації, розробленні нормативних документів та паспортів безпечності.

Зокрема показано, що відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN ISO/IEC 17025 (розділ 7.7) лабораторія відстежує достовірність своїх результатів шляхом участі у програмах перевірки кваліфікації та міжлабораторних звіряннях. ДП «УХІН» як координатор, здійснює спеціально розроблену програму міжлабораторних порівняльних вимірювань (МПП) показників якості хімічної продукції згідно ДСТУ EN ISO/IEC 17043. Програми МПП будуються за різними схемами та передбачають різні показники оцінки точності результатів вимірювань: схеми з послідовним передаванням зразків від однієї вимірювальної лабораторії (ВЛ) до іншої, і це вимагає багато часу для їх реалізації; схеми з паралельним передаванням одного і того ж зразку вимірювальним лабораторіям; схеми з радіальним передаванням зразків передбачають послідовне передавання координатором зразків ВЛ. Перевірка професійного рівня з розділеними зразками передбачає порівняння даних, які одержані невеликими групами учасників.

Відзначено, що ДП «УХІН» використовує схема з одночасним паралельним передаванням контрольних зразків випробувальним лабораторіям.

Також показано значення акредитації та дотримання вимог міжнародних стандартів для забезпечення достовірності результатів вимірювань і підвищення конкурентоспроможності продукції підприємства.

Ключові слова: аналітичний контроль, центральна лабораторія, якість, проведення досліджень, сертифіковані референтні матеріали, методики вимірювань, національна стандартизація, паспорт безпечності.

Автор для листування Н.М. Зеленська, e-mail: aisim@ukhin.org.ua

Рукопис надійшов до редакції 10.04.2026

Прийнято до публікації 01.07.2026

Опубліковано 22.07.2026 Ця стаття ліцензується відповідно до міжнародної ліцензії CC BY 4.0

Центральна лабораторія коксохімічного виробництва (ЦЛ) ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ», що створена у 1938 році, як і раніше забезпечує всі потреби виробництва в дослідницьких роботах – від вхідного контролю сировини та матеріалів, контролю технологічних процесів до випробування готової продукції. ЦЛ – сучасний аналітичний центр, акредитований національним органом з акредитації.

На сьогодні таким органом є Національне агентство з акредитації України (НААУ). Акредитація в Україні не є обов'язковою, але надає можливості:

- забезпечення єдиної технічної політики у сфері оцінки відповідності в країні;
- забезпечення довіри споживачів до результатів діяльності з оцінки відповідності;
- створення умов для взаємного визнання результатів діяльності акредитованих органів на міжнародному рівні;
- усунення технічних бар'єрів для бізнесу.

ЦЛ акредитовано як випробувальну лабораторію відповідно до Закону України «Про акредитацію органів з оцінки відповідності» з урахуванням вимог міжнародних та європейських стандартів з акредитації [1].

Крім того, лише акредитована лабораторія має право видавати результати вимірювання продукції, що згідно з Податковим кодексом України є підакцизними [2]. Одним з таких продуктів, що випускає підприємство є бензол сирий кам'яновугільний згідно з ТУ У 24.1-00190443-003-2003. Відповідно до вимог Закону України «Про державне регулювання виробництва і обігу спирту етилового, спиртових дистилатів, біоетанолу, алкогольних напоїв, тютюнових виробів, тютюнової сировини, рідин, що використовуються в електронних сигаретах, та пального» [3] для отримання ліцензії на право виробництва, оптової торгівлі, роздрібною торгівлі паливом, на право зберігання

пального до якого належить бензол сирий кам'яновугільний, необхідно додати копії технічних умов на виробництво пального визначеної якості та документа, що підтверджує акредитацію випробувальної лабораторії з визначення показників якості пального, виданого уповноваженим органом.

На ЦЛ, окрім оцінки дійсної якості продукції, покладені обов'язки з прийняття та пропозиції науково обґрунтованих заходів щодо її покращення, впровадження технічних нововведень, сприяння підвищенню кваліфікації інженерів та лаборантів.



НАЦІОНАЛЬНЕ АГЕНТСТВО З АКРЕДИТАЦІЇ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН УКРАЇНИ З АКРЕДИТАЦІЇ

АТЕСТАТ ПРО АКРЕДИТАЦІЮ



ILAC-MRA



Національне агентство з акредитації України
National Accreditation Agency of Ukraine

Зареєстрований у Реєстрі
23 лютого 2024 року
за № **20025**
дійсний до **22 лютого 2029 року**

Дата первинної акредитації: **23 лютого 2005 року**

НАЦІОНАЛЬНЕ АГЕНТСТВО З АКРЕДИТАЦІЇ УКРАЇНИ ЦИМ ЗАСВІДЧУЄ
КОМПЕТЕНТНІСТЬ

**Центральної лабораторії технічного відділу управління виробництвом
коксухімічного виробництва ПУБЛІЧНОГО АКЦІОНЕРНОГО
ТОВАРИСТВА «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»**

50095, Дніпропетровська обл., м. Кривий Ріг, вул. Орджонікідзе, 1

2	4	4	3	2	9	7	4
---	---	---	---	---	---	---	---

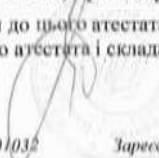
(Код ЄДРПОУ)

ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT;
ISO/IEC 17025:2017, IDT) У СФЕРІ:

**випробування готової продукції та сировини коксохімічного виробництва за
фізико-хімічними методами: амонію сульфату коксохімічного виробництва,
кислоти сірчаної технічної коксохімічного виробництва, газу коксового
очищеного, бензолу сирого кам'яновугільного, купоросу залізного технічного,
солі для промислового перероблення, полімерів бензолних відділень, смоли
важкої з кислотої смоли уловлювання для шляхового будівництва, смоли
кам'яновугільної, масла кам'яновугільного вбирного, вугілля кам'яного для
коксування, шихти вугільної для коксування, коксу доменного та
кам'яновугільного, горішку коксового, дрібняку коксового.**

Сфера акредитації визначена додатком до цього атестата.
Додаток є невід'ємною частиною цього атестата і складається з **05** аркушів.

В.о. директора



Сергій КОСТЮК

бульвар Тараса Шевченка, будинок 23, Київ, 01032 Зареєстровано у журналі обліку за № 1637 А

НААУ є підписантом: 1) Угоди EA MLA у сферах «Випробування», «Калібрування», «Сертифікація продукції», «Сертифікація персоналу», «Сертифікація систем менеджменту», «Інспектування» та «Медичні лабораторії»; 2) Угоди ILAC MRA у сферах «Випробування», «Калібрування», «Інспектування» та «Медичні лабораторії»; 3) Угоди IAF MLA у сферах «Сертифікація продукції», «Сертифікація персоналу», «Сертифікація систем менеджменту».

Одне із завдань ЦЛ полягає в експресному проведенні вимірювань для швидкого усунення проблем, що виникають у технологічних процесах. Розв'язання цього завдання полягає як у оснащенні ЦЛ сучасними експрес-аналізаторами, так і у застосуванні методик вимірювання, які дозволяють значно скоротити час проведення вимірювання. Питання щодо введення у технологічний контроль нових методик вимірювання (МВ) вирішується також завдяки співробітництва ЦЛ з ДП «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН).

Останнім часом питання розробки нових МВ викликано ще й відміною міждержавних стандартів (ГОСТів). Оскільки розробка ДСТУ на сьогоднішній день являє собою дуже тривалий та трудомісткий процес та займає дуже багато часу на перевірку, узгодження та

видання згідно встановленої законодавством процедури, розглянуто два варіанти вирішення цієї проблеми: прийняти стандарти ISO методом обкладинки або розробити відповідні МВ. Наприкінці листопада ДП «УХІН», як ТК 12 «Кокс», подано заявку до УкрНДНЦ про прийняття стандартів ISO: ISO 501, ISO 728, ISO 1171 [4-6]. Наразі цей процес триває. Тому ще наприкінці 2025 р. розроблено МВ зольності твердого палива із забезпеченням всіх зацікавлених підприємств галузі.

Крім того, за заявою ЦЛ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» та у зв'язку з відсутністю аналогічного стандарту ISO, розробляється МВ загальної сірки у твердому паливі прискореним методом з використанням наявного в ЦЛ обладнання, що в подальшому послужить основою для розробки ДСТУ.



Керівники ЦЛ постійно проводять внутрішній контроль, що складається з внутрішніх перевірок, контролю умов проведення вимірювань та внутрішньолабораторного контролю показників якості результатів вимірювань та випробувань. Внутрішній контроль проводять з використанням сертифікованих референтних матеріалів (СРМ), атестованих сумішей, методу добавок, шифрованих робочих проб та з використанням арбітражних МВ. Використовують СРМ показників якості коксу кам'яновугільного, вугілля кам'яного, смоли кам'яновугільної, складу БТК (бензол:толуол:ксилол),

масла вбирного кам'яновугільного тощо. Ці специфічні СРМ розробляє ДП «УХІН», сертифіковані значення показників та непевність отримують на підставі результатів міжлабораторного експерименту, що проводять у відповідності з вимогами ДСТУ EN ISO/IEC 17043 [7]. Використання таких СРМ у повсякденній роботі дозволяє не тільки підтвердити свою компетентність у вимірюваннях, що проводяться, але і виключити можливі помилки і неточності при видачі результатів щодо значення якості продукції, що випускається.

ДОВІДКА

Дата 07.07.2026 р. м. Харків

**ПРО УЧАСТЬ У РАУНДІ МІЖЛАБОРАТОРНИХ ПОРІВНЯНЬ
РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ**

Видана лабораторія ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»
50095, Україна, м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл., вул. Криворізької, 1
(назва лабораторії, відомості про належність, адреса)

Координатор програми МІПР
**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)»**
61073, Харків, вул. Весілля, 7
(назва організації-координатора, адреса)

повідомляє, що лабораторія брала участь у 3 раунді Програми міжлабораторних порівнянь результатів вимірювань показників якості масла кам'яновугільного вбирного.

У рамках виконання Програми МІПР визначалися наступні показники якості масла кам'яновугільного вбирного: масова частка нафталіну.
(номер раунду, назва програми, показники, що визначаються)

під умовним кодом «2»

та отримала такі експериментальні результати: Акти № 01 від «18» червня 2026 р.

Загальна оцінка точності результатів вимірювань, виконаних у лабораторії, за результатами проходження раунду МІПР, виходячи зі значення показника відтворюваності у вигляді табл. А1 – Оцінка точності результатів вимірювань, виконаних у лабораторії, за значенням показника відтворюваності.

Керівник організації-координатора **Олександр БОРИСЕНКО**
(ім'я, по батькові та прізвище)

М.П.

Відповідальний співробітник організації-координатора **Ірина ПАЛЬВАЛЬ**
(ім'я, по батькові та прізвище)

Відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN ISO/IEC 17025 (розділ 7.7) лабораторія відстежує достовірність своїх результатів шляхом участі у програмах перевірки кваліфікації та міжлабораторних звіряннях [8]. ДП

«УХІН» як координатор, здійснює програму міжлабораторних порівняльних вимірювань (МІПР) показників якості хімічної продукції згідно ДСТУ EN ISO/IEC 17043 [7]. Програми МІПР будуються за різними схема-

ми та передбачають різні показники оцінки точності результатів вимірювань:

- схеми з послідовним передаванням зразків від однієї вимірювальної лабораторії (ВЛ) до іншої, і це вимагає багато часу для їх реалізації;
- схеми з паралельним передаванням одного і того ж зразку вимірювальним лабораторіям;
- схеми з радіальним передаванням зразків передбачають послідовне передавання координатором зразків ВЛ.

Перевірка професійного рівня з розділеними зразками передбачає порівняння даних, які одержані невеликими групами учасників. ДП «УХІН» використовує схему з одночасним паралельним передаванням контрольних зразків випробувальним лабораторіям. Така схема проведення МПР використовується для виявлення незадовільної повторюваності результатів вимірювань, оцінки непевності за типом В, перевірки ефективності попереджувальних заходів і використовується для зовнішнього контролю точності результатів вимірювань.

Результати участі у Програмі МПР оформлюються у вигляді Протоколів з таблицями результатів вимірювань. Лабораторія отримує Довідки про участь в міжлабораторних вимірюваннях.

Співробітники ЦЛ залучаються технічним відділом підприємства до участі у проведенні робіт зі стандартизації, а саме – у розгляді проєктів нормативних документів (ДСТУ, ТУ У) та паспортів безпечності на хімічну продукцію.

Стандартизація є діяльністю, спрямованою на впорядкування певної сфери шляхом досягнення оптимального рівня організації та регулювання. Вона охоплює розроблення, затвердження, оприлюднення й практичне застосування стандартів. Основними нормативно-правовими актами у цій галузі є Закон України «Про стандартизацію» від 05.06.2014 року, а також національні стандарти ДСТУ 1.2, ДСТУ 1.5, СОУ КЗПС 74.9-02568182-003 [9-12], що визначають порядок проведення робіт зі стандартизації, вимоги до розроблення, оформлення та викладення нормативних документів, а також процедури прийняття й використання міжнародних та регіональних стандартів.

Головними завданнями стандартизації є:

- забезпечення відповідності об'єктів їх функціональному призначенню;
- підвищення ефективності виробництва шляхом використання загально визначених правил, рекомендацій і процедур;
- захист життя та здоров'я населення;
- охорона прав і законних інтересів споживачів;
- створення безпечних умов праці;
- збереження навколишнього середовища та раціональне використання ресурсів;

– усунення й недопущення технічних перешкод у торгівлі, а також сприяння розвитку та підвищенню конкурентоспроможності продукції.

ДП «УХІН» здійснює розроблення нормативних та інших обов'язкових документів для коксохімічної продукції, зокрема національних стандартів (ДСТУ), технічних умов (ТУ У), паспортів безпечності (ПБ). Ці документи використовуються всіма коксохімічними підприємствами України. Більшість технічних умов є спільними для всіх коксохімічних підприємств країни, проте окремі нормативні документи були розроблені спеціально для потреб ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ», а саме:

- ТУ У 19.1-00190443-014:2025 Дрібняк коксовий ПАТ «АРСЕЛОР-МІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»;
- ТУ У 05.1-00190443-032:2022 Шихта вугільна для коксування ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»;
- ТУ У 19.1-00190443-076:2024 Шлам від пропарки цистерн;
- ТУ У 19.1-00190443-077:2024 Залишки механічної чистки ємностей і сховищ з кам'яновугільною смолою;
- ТУ У 35.2-00190443-096:2020 Газ коксовий неочищений ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»;
- ТУ У 19.1-00190443-173:2020 Кокс доменний ПАТ «АРСЕЛОР-МІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»;
- ТУ У 19.1-00190443-174:2020 Горішок коксовий ПАТ «АРСЕЛОР-МІТТАЛ КРИВИЙ РІГ».

З цього року ДП «УХІН» розробляє паспорти безпечності хімічної продукції, які відповідають вимогам Технічного регламенту щодо безпечності хімічної продукції [13]. На вимогу вищезазначеного регламенту виробник продукції має розробити та надати споживачу хімічної продукції паспорт безпечності хімічної продукції або інструкцію з безпечного використання залежно від небезпечності хімічної продукції.

Паспорт безпечності хімічної продукції - документ уніфікованої форми, що містить дані про небезпечні властивості хімічної продукції та заходи щодо її безпечного використання і видається наступному в ланцюгу постачання хімічної речовини або хімічної продукції суб'єкту господарювання для інформаційного супроводу поводження з хімічною продукцією.

Паспорт безпечності хімічної продукції повинен містити інформацію про дату його розробки та наступні розділи:

- 1) Ідентифікація хімічної продукції та суб'єкта господарювання;
- 2) Ідентифікація небезпеки;
- 3) Склад/інформація про компоненти;
- 4) Заходи першої допомоги;
- 5) Заходи пожежної безпеки;
- 6) Заходи ліквідації аварійного викиду;
- 7) Поводження та зберігання;
- 8) Контроль впливу та засоби індивідуального захисту;

- | | |
|--|--|
| 9) Фізико-хімічні властивості; | 13) Рекомендації щодо оброблення відходів; |
| 10) Стабільність та реакційна здатність; | 14) Інформація щодо транспортування; |
| 11) Токсикологічна інформація; | 15) Інформація щодо законодавства; |
| 12) Інформація щодо впливу на довкілля; | 16) Інша інформація. |



Висновок

Сформована протягом десятиліть ефективна комунікація між підприємством та інститутом у питаннях підвищення якості досліджень та стандартизації сприяє отриманню достовірних результатів та безперешкодному оформленню та отриманню документів дозвільного характеру на продукцію.

Бібліографічний список

1. Закон України «Про акредитацію органів з оцінки відповідності», від 17 травня 2001 року № 2407-III / База даних «Законодавство України» / ВР України / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2407-14#Text>
2. Податковий Кодекс України, від 2 грудня 2010 року № 2755-VI, із змінами і доповненнями / База даних «Законодавство України» / ВР України / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17>
3. Закон України «Про державне регулювання виробництва і обігу спирту етилового, спиртових дистилатів, біоетанолу, алкогольних напоїв, тютюнових виробів, тютюнової сировини, рідин, що використовуються в електронних сигаретах, та пального», від 18 червня 2024 року № 3817-IX / База даних «Законодавство України» / ВР України / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3817-20#Text>
4. ISO 501:2025 Hard coal — Determination of the crucible swelling number. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland; 2025.
5. ISO 728:2021 Coke — Size analysis by sieving. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland; 2021.
6. ISO 1171:2024 Coal and coke — Determination of ash. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland; 2025.
7. ДСТУ EN ISO/IEC 17043:2017 (EN ISO/IEC 17043:2010; ISO/IEC 17043:2010, IDT). – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 39 с.
8. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT) Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 30 с.
9. Закон України «Про стандартизацію», від 05 червня 2014 року № 1315-VII / База даних «Законодавство України» / ВР України / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1315-18>
10. ДСТУ 1.2:2024 Національна стандартизація. Правила проведення робіт з національної стандартизації. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2024. – 40 с.
11. ДСТУ 1.5:2015 Національна стандартизація. Правила розроблення, викладання та оформлення національних нормативних документів. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 65 с.
12. СОУ КЗПС 74.9-02568182-003:2016 Технічні умови України. Настанови щодо типової побудови, викладення, оформлення, позначення, прийняття та надання чинності – Чинний від 2016-01-13 – Київ: ДП «Укрметртестстандарт», 2016 – 47 с.
13. Технічний регламент щодо безпечності хімічної продукції, Постанова КМУ від 23 липня 2024 року № 847 / База даних «Законодавство України» / ВР України / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/847-2024-%D0%BF#Text>

DOI: 10.31081/1681-309X-2026-0-4-48-56

Speciality: G1 (161). U.D.C.: 542.1

THE ROLE OF THE CENTRAL LABORATORY IN THE SYSTEM OF ANALYTICAL CONTROL, STANDARDIZATION AND QUALITY ASSURANCE© A.Yu. Martynova¹, N. M. Zelenska²

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

O.P. Solonko³

Coke and By-Product Plant of PJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”, 50095, Kryvyi Rih, Krivorozhstal st., 1, Ukraine

¹ Martynova Alla Yuriivna, Ph.D. in Technical Sciences, Head of Department of Analytical Research, Standardization, Metrology and Ecology (DARSM and E), ORCID: 0009-0009-1288-7765, Scopus ID: 57203485255, e-mail: alla_martynova_aisim@ukr.net

² Natalia Mykhailivna Zelenska, Senior Scientific Researcher in DARSM and E, ORCID: 0009-0008-0327-5137, e-mail: aisim@ukhin.org.ua



³ Olena Petrivna Solonko, Head of the Central Laboratory of the Technical Department, ORCID: 0009-0005-7811-7676, e-mail Olena.Solonko@arcelormittal.com

This article examines the role of a central laboratory within an industrial enterprise in ensuring product quality at all stages of the production cycle – from the incoming inspection of raw materials to the testing of finished products. It describes the functions of the laboratory as a modern analytical center, accredited in accordance with national and international standards, as well as its involvement in the implementation and application of measurement methods and certified reference materials. Particular attention is paid to participation in interlaboratory comparison programmes, internal quality control and cooperation with the State Enterprise 'UKHIN' in the field of standardization, the development of regulatory documents and safety data sheets.

In particular, it is demonstrated that, in accordance with the requirements of the DSTU EN ISO/IEC 17025 standard (clause 7.7), the laboratory monitors the reliability of its results by participating in proficiency testing programmes and interlaboratory comparisons. State Enterprise 'UKHIN', as the coordinator, implements a specially designed programme of interlaboratory comparative measurements (ICM) of quality indicators for chemical products in accordance with DSTU EN ISO/IEC 17043. ICM programmes are structured according to various schemes and involve different methods for assessing the accuracy of measurement results: schemes involving the sequential transfer of samples from one measurement laboratory (ML) to another, which are time-consuming to implement; schemes involving the parallel transfer of the same sample to several measurement laboratories; schemes involving the radial transfer of samples, in which the coordinator sequentially transfers samples to the MLs. Proficiency testing with split samples involves comparing data obtained by small groups of participants.

It is noted that the State Enterprise 'UKHIN' employs a scheme involving the simultaneous, parallel dispatch of control samples to testing laboratories.

The importance of accreditation and compliance with international standards in ensuring the reliability of measurement results and enhancing the competitiveness of the enterprise's products is also highlighted.

Keywords: analytical control, central laboratory, quality, research, certified reference materials, measurement methods, national standardization, safety data sheet.

Corresponding author: N.M. Zelenska, e-mail: aisim@ukhin.org.ua

Manuscript received 2026-04-10

Accepted for publication 2026-07-01

Published 2026-07-22

This article is licensed under a CC BY 4.0 license

90 років КХВ

*Без коксохімії не можна уявити,
Беззаперечно, наш сучасний світ:
Метал варити, овочі ростити,
Створити ліки або динаміт.*

*Вже 90 років криворізький
Виходить кокс із коксових печей.
Характер має, справді, український:
Міцний, гарячий, що вогнем пече.*

*Тут справжнє відбувається чаклунство:
Танок вогню, повітря і води.
І перетворює старання працелюбство,
На «сіре золото» вугілля тут завжди.*

*Ми – коксохіміки, скажу про це я гордо,
Бо кожен з нас – немов би чарівник.
Нехай ми не маркизи і не лорди,
Важливим є звичайний працівник.*

*Щоденно працюю маюємо картину,
Що зветься «Робітнича акварель».
Виблискує сульфат, вогню лавини,
І тягнеться смола, як карамель.*

*Ми – коксохіміки, сьогодні у нас свято,
Нам – 90, честь нам і хвала!
Націлені завжди перемагати,
Куди б життєва стежка не вела.*

*Зі святом вас, колеги, я вітаю,
Нехай сьогодні буде все о'кей!
Упевнено скажу, що вірю, знаю:
Відзначимо й сторічний ювілей!*

*Вікторія Бурдіян,
провідний інженер-технолог
технічного відділу УВ КХВ*

Вуглехімічний журнал видається з 1993 р.

ДП «УХІН» зареєстровано суб'єктом у сфері друкованих медіа Рішенням № 1389
Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
(протокол № 27 від 16.11.2023 р.)
Ідентифікатор медіа R30-01930

Друкується згідно з рекомендацією вченої ради ДП «УХІН»,
протокол № 3 від 01. 07. 2026 р.

Відповідальний за випуск Чешко Ф.Ф.

Набір тексту та макет Званчук-Малік В.Г.

Ціна договірна

Підписано до друку 22.07.2026 р. Формат 60×84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Друк офсетний.

Облік.-видавн. арк. 6,54. Умовн. друк. арк. 6,51. Наклад 150 прим. Зам. № 26-88.

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