

УДК 614.84

Д. Г. Трегубов, к.т.н., доцент, проф. каф. (ORCID 0000-0003-1821-822X)
Л. М. Трефілова, д.т.н., професор, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8939-6491)
О. М. Даник, ст. викл. каф. (ORCID 0009-0003-6849-3403)
К. О. Русенко, викл. каф. (ORCID 0009-0009-4866-6032)
В. С. Мазуров, курсант (ORCID 0009-0009-0415-7834)
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ДОСВІДУ ПОЖЕЖОГАСІННЯ У ТЕХНОЛОГІЇ МОКРОГО ГАСІННЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОКСУ

Вдосконалено технологію мокрого гасіння металургійного коксу. Проведено порівняння ефективності, економічності та екологічності процесів охолодження коксу після видачі з печі шляхом мокрого та сухого способів. Проаналізовано подібність цих процесів до водяного пожежогасіння та гасіння пожеж негорючими газами. Акцентовано увагу на перевагах та недоліках мокрого гасіння та доцільності вдосконалення даної технології. Аргументовано, що одностадійне гасіння коксу має значні термічні напруження у шматку внаслідок значного перевищення температури середини шматка над температурою поверхні, що водночас знижує ефективність знешкодження домішок стічних вод на поверхні коксу. Показано теоретичну можливість підвищення ефективності утилізації стічних вод за допомогою мокрого гасіння, зменшення витрати води, підвищення якості коксу як важливого компонента доменного процесу, зменшення області токсичної загазованості біля башти гасіння. Встановлено, що даний комплекс питань можна вирішити шляхом добору етапності подавання води на гасіння в імпульсному режимі, який може забезпечити рівномірність процесу охолодження шматка коксу. Розраховано теоретичне значення охолоджуючої здатності води за умов стандартного одностадійного мокрого гасіння коксу та за умов повного використання цієї здатності. Показано, що ефективність використання води як охолоджуючого засобу збільшується за умови її повного випаровування та нагрівання пари до температури коксу. За проведеною оцінкою час подавання та витрата води за повного використання її охолоджуючої здатності скорочуються у 7,5 разів. Запропоновано проводити мокре гасіння у 3 етапи: на 1 хв – концентрованою стічною водою, на 2 хв – розбавленою з ліквідацією цих вод, на 3 хв – технічною водою. Розроблено систему інтервалів імпульсного режиму подавання води на охолодження коксу зі схемою «подавання-пауза» з загальним часом гасіння 219 с, з яких загальний час подавання води – 19 с.

Ключові слова: металургійний кокс, гетерогенне горіння, мокре гасіння, стічна вода, імпульсне розпилення, утилізація

1. Вступ

Однією з найбільш вагомих галузей промисловості України є металургійна, яка базується на коксохімічному виробництві. Кокс використовують як відновник під час виготовлення чавуну та феросплавів, у ливарній технології, у якості сировини для виробництва карбіду кальцію тощо. За технологією кокс отримують шляхом нагріву деяких марок вугілля або скомпонованих з різних видів вугілля шихт протягом 16–17 годин з досягненням температури 1050 °С [1]. Після цього готовий коксовий пиріг виштовхують з печі. При цьому розпечений карбоновий залишок набуває контакт з повітрям і починає інтенсивно горіти, що потребує заходів гасіння. Аналогічна проблема має місце під час завершення гасіння пожеж класу А1 з наявністю осередків тління, яку вирішують шляхом подавання достатньої кількості води або води зі змочувачем для ефективного охолодження як поверхні, так і внутрішніх шарів матеріалу до температури, за якої самопідтримуване горіння карбонізованих матеріалів вже не відбувається [2]. Схожим чином поступають і у технології коксування, за якою розжарений кокс виштовхують у гасильний вагон, який пересувають під гасильну вежу і зрошують великою кількістю

води з охолодженням до 250 °С, що забезпечує відсутність самозаймання на рампі, де завершують охолодження та підсушування коксу [3]. Для гасіння застосовують розбавлену стічну воду, що дозволяє знешкоджувати її домішки та зменшувати об'єм. Але таке гасіння має технологічні, економічні та екологічні недоліки: зниження міцності крупнозернистого коксу, додаткові витрати тепла на випаровування вологи у доменному процесі, втрата тепла коксування, витрата технічної води, корозія гасильного вагону та конструкцій, забруднення довкілля компонентами пароповітряної хмари, що утворюється під час мокрого гасіння.

Існують інші шляхи впливу на процес горіння. Так, у практиці запобігання та припинення горіння використовують флегматизацію горючих середовищ негорючими газовими системами [2, 4]. Такий підхід використано в установках сухого гасіння коксу, що усуває частку недоліків мокрого гасіння [1, 5]. Установка дозволяє охолоджувати кокс, не допускати його горіння та забезпечує рекуперації тепла. Розжарений кокс містить до 1550 МДж тепла на 1 т вихідної шихти, що аналогічно спалюванню 53 кг умовного палива. Але капіталовкладення у таку технологію повертаються через строк до 8 років, на заводі залишають працездатну установку мокрого гасіння як резервну, ревізія котла-утилізатора займає 1 місяць протягом року, на очищення підлягають більші кількості води з більшою концентрацією забруднень, утворення негорючого газу під час кожного запуску установки здійснюється подачею повітря, що призводить до згоряння близько 3 % коксу, в атмосферу викидаються коксовий пил та парникові гази (за нормами – не більше 1500 мг/м³; в перспективі – 250 мг/м³), необхідність рампи зберігається для висушування від пірогенетичної вологи.

Тому у науково-практичній площині залишається інтерес до розвитку технології мокрого гасіння металургійного коксу як способу знешкодження та утилізації стічних вод з наявністю можливостей для рекуперації тепла та покращення інших показників процесу.

Таким чином, залишається остаточно не вирішеною проблема у технології отримання металургійного коксу здійснення ефективного, економічного та екологічного гасіння розжареного продукту після його видачі з печі.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сучасна технологія гасіння металургійного коксу полягає в одностадійному проливанні водою розжареного «пирога» з температурою близько 1000 °С для охолодження і можливості формування готової товарної продукції [1, 3]. Для цього, як правило, подають стічні фенольно-аміачні води заводу, що зменшує їх кількість на 30 % та полегшує роботу систем водоочищення для оборотного водопостачання або скидання у водойми. Для захисту довкілля від забруднень стічної води та запобігання утворення на поверхнях шматків коксу плівки важких органічних сполук стічні води попередньо очищують від смол, масел, нафталіну та розбавляють технічною водою. У повітря потрапляє як частина домішок, що містять стоки, так і шкідливі речовини, які синтезуються на розжареному коксі. Забруднена хмара за певних умов може поширюватися на багато кілометрів та виходити за межі санітарної зони. Проблемами, які потребують вирішування також є корозійний вплив водяної пари та деяких домішок на гасильні вагон і башту, зниження міцності коксу за умов термічних напружень, погіршення ефективності доменного процесу внаслідок зволоження коксу, відсутність рекуперації тепла розжареного коксу, потреба у додаткових витратах чистої води та втрати води з оборотного циклу.

Втрати тепла зумовлені тим, що все тепло коксу йде на нагрів та часткове випаровування води, а тому безповоротно втрачається.

Гасіння та охолодження коксу водою здійснюють у гасильній башті, куди розташовують спеціальний гасильний вагон з розжареним коксом щойно виданого «коксового пирога». Зрошування водою через систему рівномірно розташованих форсунок проводять протягом до 90 с з наступним відстоюванням вагону для стікання води до 100 с. З огляду на те, що на коксохімічному заводі працюють водночас десятки камер коксування, які синхронизовано на почерговий вихід на готовність, гасильна башта працює безперервно і часові рамки є строго обмеженими. Витрата води на процес гасіння досягає 5 м^3 на 1 т отриманого товарного коксу, при цьому близько $0,5 \text{ м}^3$ (до 12 %) води втрачається у вигляді пари. Під гасильною баштою формується сток з температурою близько 45°C . Цю воду після відстоювання від дрібнодисперсних частинок коксу, доповнюють технічною та очищеною стічною водою знов застосовують для наступного гасіння. Кокс з температурою 250°C розсипають на рампу – широкий похилий майданчик, де додатково зрошують технічною водою, іноді в ручному режимі проливають осередки самозаймання та витримують для висушування близько 20 хв. При цьому у коксі залишається переважно адсорбована волога у кількості до 1 %.

Для мокрого гасіння частіше змішують стічну і технічну воду з добавками проти корозії [6], тоді на гасіння поступає вода з вмістом домішок до наступних концентрацій, г/дм^3 : сульфати – 8,8; летучий аміак – 0,34, зв'язаний – 2,6; хлориди (за Cl) – 4,4; тіоціанати – 1,2; ціаніди – 0,2, феноли – 0,8. Після гасіння концентрація летучого аміаку у воді знижується у 5 разів, сірководню – у 10, фенолів – у 6. Поки кокс залишається розжареним на його поверхнях піддається окисненню або розкладається до 60 % фенолів вихідної розбавленої січної води, 5 % залишається у її складі, інша (35 %) – потрапляє у повітря у вигляді забруднення, коли поверхня коксу вже частково охолонула для другої частини води цей розподіл змінюється: 10 % – знешкоджується, 40 % – переходить у новий склад стічної води, 50 % – забруднює повітря. З хмари протягом її поширення та остигання формуються опади, які впливають на конструкції, будівлі та рослинність. Тому вміст домішок у воді для гасіння обмежується такими концентраціями, мг/дм^3 : смоли та масла – 100, феноли – 150, тіоціанати – 100, сірководень – 10, вода має бути вільна від лугів, солей хлорвмісних кислот. Вимога стосовно смол та масел визначається тим, що вони за потрапляння у повітря створюють задушливу атмосферу, що може призвести до угоряння людей. Стічні води після мокрого гасіння коксу не придатні для зливу у водойми.

Означений стан питання охолодження коксу зумовив потребу розробки альтернативних технологічних рішень, які розвивалися у напрямках етапного гасіння водою, сухого гасіння негорючими газами [7], а також – через технологію середньотемпературного коксу [8, 9], яка не потребує мокрого гасіння, але інший стан коксу передбачає переобладнання під нього металургійного виробництва, що на даний час мало реально.

За технологією сухого гасіння кокс перевантажують з гасильного вагона у закриту футеровану камеру, де обдувають оборотними газами, які утворюються під час реакції коксу з повітрям камери в момент запуску установки: CO_2 , CO, N_2 . У подальшому ця суміш за умов контакту з коксом нагрівається з 200 до 800°C , а кокс остигає до 250°C . Нагріті гази направляють для вироблення електроенергії у парові котли-утилізатори, у яких утворюється до 40 т/год перегрітої пари з серед-

ньою температурою 450 °С. Гази надалі повертають на новий цикл охолодження нової партії коксу. Такий вплив на кокс підвищує його якість, ефективність коксового і доменного виробництв, і частково знижує забруднення повітря внаслідок відсутності викидів забрудненої пари, товарний кокс виходить з меншою вологістю та більшою міцністю, шихту для коксування можна готувати з менш спікливого вугілля. Але, як вже було сказано, складна технологія має низьку окупність, щорічні періоди простою для технічного обслуговування, загострюється проблема очищення стічних вод, втрачається близько 3 % внаслідок вигорання, технологія потребує очищення газових викидів від коксового пилу, утворюються парникові газу тощо.

Викладене вище зумовлює необхідність продовження пошуків шляхів для підвищення ефективності та екологічності мокрого гасіння коксу. Близькі проблеми має і вдосконалення гасіння пожеж класу А, особливо у напрямку зменшення витрат води на гасіння та відповідних побічних збитків [10]; означену проблему часто вирішують імпульсним подаванням води на пожежогасіння. Завдання, які підлягають вирішенню для покращення мокрого гасіння коксу наступні: запобігти поширенню пароповітряної хмари поза гасильної башти для усунення корозії навколишніх конструкцій, а також небезпечних речовин та запахів, рекуперація тепла коксу, збереження міцності коксу, отримання коксу після гасіння з меншою вологістю, зменшення витрати та втрат технічної води, зменшення забруднення атмосфери коксовим пилом, домішками стічних вод та синтезованими під час гасіння шкідливими речовинами, зменшення часу технологічних операцій усього циклу охолодження коксу, конденсація усієї пари для повернення води в оборотний цикл.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої наукової проблеми є недосконалий режим мокрого гасіння металургійного коксу, що знижує якість продукту та веде до поширення забруднень. Для вирішення цього питання можна скористатись досвідом вдосконалення систем пожежогасіння [2].

3. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є розробка імпульсного режиму мокрого гасіння металургійного коксу з меншими витратами води загалом та технічної зокрема, підвищенням ступеню руйнування домішок стічних вод, отриманням коксу з більшою міцністю та меншою вологістю.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення наступних завдань:

- визначити механізми руйнування домішок стічної води під час мокрого гасіння коксу;
- розробити режими імпульсного подавання води на мокре гасіння коксу з формуванням менших термічних напружень у шматку коксу.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є гасіння розжареного металургійного коксу.

Предметом дослідження є часові параметри імпульсного режиму охолодження шматка коксу водяними струменями, витрата води на гасіння та показники збільшення глибини процесів деструкції домішок стічної води.

Гіпотезою дослідження є можливість отримання більш міцного та менш вологого коксу, водяного газу для енергетичних цілей, більшої глибини очищення стічної охолоджуючої води, меншого забруднення повітря, меншої витрати води

за рахунок ефективної схеми її імпульсного подавання.

Методом дослідження є розрахункова оцінка періодів подавання води та пауз між ними для забезпечення на момент потрапляння води на поверхню шматка коксу його максимальної температури на основі енергетичних показників охолоджуючої здатності води, які прийнято розраховувати як основу для технологій пожежогасіння струменями води, та залежностей для охолодження шматка коксу.

Дослідженню підлягають: металургійний кокс як об'єкт для плавного охолодження та джерело теплового впливу на компоненти стічної води, стічна вода як витратний компонент, який підлягає економії, як енергоносіє та як джерело забруднень, які підлягають знешкодженню. Під час таких досліджень враховано досвід гасіння пожеж з імпульсним режимом подавання води.

Головним параметром, який підлягає керуванню є температура поверхні шматка коксу. Під час охолодження поверхні зменшується її здатність до ініціювання процесів деструкції компонентів фенольно-аміачної стічної води, тому потрібно провести аналіз можливих процесів термодеструкції, здатності до окиснення та інших хімічних реакцій, які можуть формувати водяний газ та призвести до знешкодження домішок стічних вод, відповідно до температурного діапазону для поверхні коксу під час охолодження. Важливими компонентами стічної води, які підлягають знешкодженню або контролю у газовому просторі та у залишковій воді є: синильна кислота, феноли, зв'язаний аміак, сірководень, тіоціанати, смоли, масла, луи, солі хлорвмісних кислот, а також діоксид сірки.

Другим важливим параметром є зменшення обсягів використання води, у тому числі технічної, за рахунок більшої ефективності використання охолоджуючої здатності води під час імпульсного подавання у шар розжареного коксу. Додатковим параметром, який потребує дотримання, – є часовий регламент роботи гасильної башти та рампи, де відбувається гасіння та охолодження коксу.

5. Визначення механізмів руйнування домішок стічної води під час мокрого гасіння коксу

За принципом знешкодження стічних вод мокре гасіння металургійного коксу можна віднести до термохімічних методів [11]. Проаналізуємо можливі хімічні реакції за умов наявності температур до 1000 °С, карбону металургійного коксу, кисню та азоту повітря, води та водяної пари, органічних та неорганічних домішок стічної фенольної води.

Головними домішками води під час охолодження розжареного коксу фенольним стоком є синильна кислота, зв'язаний аміак, фенол, сірководень. Ці ж речовини, а також діоксид сульфуру, є головними токсичними домішками у складі пари яка викидається в атмосферу. Це свідчить про те, що ступінь повноти процесів термодеструкції та окиснення вказаних речовин під час мокрого гасіння розжареного коксу мала. Але слід зауважити, що початкова температура гарячого коксу 950–1100 °С, наявність повітря та інших реагентів достатні для ініціювання багатьох відповідних процесів. Про їх протікання свідчить й виділення SO₂ та відомі дані з дослідження двоетапного мокрого гасіння коксу (спочатку фенольною, а потім технічною водою) [7]: 60 % фенолів стічної води переходять у склад парової хмари, до 45 % утилізується шляхом деструкції та окиснення на розпечених поверхнях коксу, а до 5 % потрапляє з залишковою водою у відстійники.

Хімічні реакції схожі на процеси протягом мокрого гасіння мають місце й під час зрошення гарячого коксового газу фенольно-аміачною водою. При цьому

відмічають невідповідність між концентрацією фенолів, що потрапляють у повітря після градирні та у конденсаті. Фенолів потрапляє в атмосферу значно менше, ніж у стічну воду, що свідчить про їх парогозове окиснення.

Малі концентрації продуктів розкладання у газовій фазі свідчать про те, що більшу частину часу відбувається контакт води з коксом, який має вже значно охолоджену зовнішню поверхню. За таких умов можливості розжареної поверхні, як джерела тепла для термодеструкції токсичних речовин, використано не повною мірою. Так, вміст тіоціанатів у воді після гасіння збільшується, не зважаючи на те, що температура розкладання тіоціаната калію $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. З цього можна припустити, що більший час контакту води з коксом за умови одностадійного гасіння його поверхня має $t < 250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На розжареній поверхні коксу можуть протікати процеси розкладання органічних та деяких неорганічних сполук, парогозове окиснення, неінтенсивне рідкофазне окиснення та утворення водяного (генераторного) газу. Інтенсивне рідкофазне окиснення органічних сполук потребує тисків більших за 20 атм. для підвищення розчинності у воді кисню, тому такий процес за умов мокрого гасіння коксу є неможливим.

Під час аналізу комплексу хімічних процесів, які можуть мати місце за умов мокрого гасіння, будемо спиратись на той факт, що концентрації HCN, H_2S та SO_2 у паровій хмарі, що утворюється при гасінні стічною або технічною водою, є приблизно однаковим. Це свідчить про те, що реакції їх утворення визначаються наявністю розжареного коксу, води та повітря, і майже не залежать від вмісту типових домішок в попередньо очищеній стічній воді.

Почнемо аналіз з максимальних температур коксу – $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$. На карбоновій поверхні розжареного коксу за температур $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ за умов подачі води починає утворюватися водяний газ (синтез-газ, генераторний газ) приблизно наступного складу (найбільший вихід водню спостерігається за температур поверхонь $900\text{ }^{\circ}\text{C}$): $\text{CO} - 44\%$, $\text{N}_2 - 6\%$, $\text{CO}_2 - 5\%$, $\text{H}_2 - 45\%$, а також метан, CS_2 , H_2S тощо з основною реакцією: $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO} - 132\text{ кДж/моль}$, та вторинною: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$. За умови наявності перегрітої пари температура початку формування водяного газу знижується до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, а активний процес відбувається вже починаючи з $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Приблизна нижня концентраційна межа поширення полум'я водяного газу становить $6,7\%$, а теплота згоряння – 11723 кДж/м^3 , його застосовують як паливо в металургійній, керамічній промисловості, при виготовленні скла, для синтезу аміаку, метанолу тощо. Крім того, під час реакції 1 молу водяної пари з карбоновою поверхнею шматка коксу утворюється 2 молі продуктів реакції, що вже дозволяє виконувати роботу турбіни та отримувати енергію.

Утворення сірководню може бути результатом взаємодії водню зі складу водяного газу з сіркою коксу (шкідлива домішка для металургійного процесу [1], тобто ця реакція надає позитивний ефект) за температур $350\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (інтенсивніше на каталізаторі): $\text{H}_2 + \text{S} = \text{H}_2\text{S}\uparrow$. За більших температур має відбуватись зворотна реакція, якщо сірководень утворився раніше іншими шляхами. Так, можливе протікання реакції з водою водорозчинних сульфідів: $\text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{S} + \text{NaOH}$. Парафінові вуглеводні за підвищених температур реагують з сіркою з виділенням сірководню та карбону, який може додаватися до шламу або уноситися з парами води (що і спостерігається при мокрому гасінні). За температур близько $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ сірка може взаємодіяти з карбоном з утворенням сірковуглецю: $2\text{S} + \text{C} = \text{CS}_2$.

Виділення діоксиду сірки може бути результатом окиснення сульфідів заліза

на повітрі за підвищених температур до 800 °C: $4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 = 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2$. Сульфід заліза є первинним продуктом корозії заліза під дією сірководню. Найпростіший шлях утворення SO_2 – високотемпературне окиснення сірки киснем повітря, наприклад, процес згоряння: $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$.

Синильна кислота під час мокрого гасіння може формуватися у режимах рідкофазного окиснення тіоціанатів: $\text{NH}_4\text{SCN} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NH}_4\text{HSO}_4 + \text{HCN}$. Але відомо, що ця сполука утворюється й при гасінні чистою технічною водою, крім того, вміст тіоціанатів у стічних водах після гасіння збільшується. Тобто, синильна кислота є результатом взаємодії розжареного карбону коксу з водяним (генераторним) газом. Такий процес може відбуватись як реакція аміаку з метаном на повітрі на платиновому каталізаторі: $\text{NH}_3 + \text{CH}_4 + 1,5\text{O}_2 = \text{HCN} + 3\text{H}_2\text{O}$; або без доступу повітря за температур більших за 1050 °C: $\text{NH}_3 + \text{CH}_4 = \text{HCN} + 3\text{H}_2$, але така реакція не встигне суттєво відбутися. Тоді, скоріш за все, якийсь компонент коксу по відношенню до синильної кислоти має каталітичну активність. Тіоціанати здатні до термодеструкції. При перегріві більше за 250 °C KSCN повільно розкладається на сульфід та ціан, останній є трохи менш токсичним ніж HCN та ціаніди: $\text{KSCN} \rightarrow \text{C}_2\text{N}_2 + \text{K}_2\text{S}$. За доступу повітря та можливості згоряння ціан реагує з утворенням не токсичних продуктів: $\text{C}_2\text{N}_2 + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + \text{N}_2$.

Температура початку розкладання тіоціаната амонію – 170 °C, тіоціаната натрію – 307 °C. Але оскільки після мокрого гасіння вміст тіоціанатів у стоці збільшується, можна припустити, що ці реакції відбуваються не інтенсивно.

Парогазове окиснення фенолів потребує температур більших за 800 °C, але за умов наявності каталізаторів (платина, паладій, міднооксидні каталізатори) ця межа знижується до 350 °C: $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH} + 14\text{H}_2\text{O} = 3\text{H}_2\text{O} + 6\text{CO}_2 + 14\text{H}_2$. Низькотемпературна взаємодія з киснем фенолів відбувається за схемою [12, 13]: вони гідроксильються, утворюють хінони, карбонові оксіхінони, гумінові кислоти, пероксидні сполуки, аж до CO_2 і H_2O .

Таким чином, температура карбонової поверхні розжареного коксу може ініціювати низку реакцій за участю домішок стічної води, що забезпечить їх утилізацію та зменшить забруднення як повітряного навколишнього простору, так і залишку стічної води, яка не встигла випаруватись на гарячому коксі. Але протікання багатьох з наведених реакцій вимагає наявності високих температур.

6. Розробка режиму імпульсного подавання води на мокре гасіння коксу

Напрямом вдосконалення стандартної технологією мокрого гасіння металургійного коксу с (рис. 1, крива 3) є використання режиму послідовного подавання стічної, а потім технічної води, що впроваджують без конструктивних змін установки гасіння [7]. За таких умов зафіксовано зростання міцності крупнозернистого коксу, зменшення вмісту сірки та формування шламу. На гасіння 630 кг розжареного коксу витрачається 945 л води, з них фенольно-аміачного стоку 160 л, з яких 315 л переходить у пару, тобто 33 %. Технічну воду подавали через 40 с. У відстійнику після завершення гасіння формується стічна вода нового складу, яка містить 3 % вихідної кількості фенолів та 6 % сполук аміаку.

Якщо період подавання води становить до 2 с, то її охолоджуючої здатності вистачає лише для охолодження поверхні, при цьому більша частина води випаровує. Наявні дослідні дані показують [7], що для забезпечення рівномірного зниження температури шматка коксу загальна тривалість подавання води протягом 1 хв має становити близько 27 с. При цьому перша порція води має подава-

тися протягом 15 с. Тоді для загальної тривалості гасіння 2,5 хв досліджено наступну схему охолодження у режимі «подача-пауза» подавання, с: 20–15, 16–15, 16–17, 16–25, 10–30. За такого режиму загальний час подавання води склав 78 с (рис. 1, крива 2а). За наведеними залежностями температура поверхні у період пауз майже не встигала зростати за рахунок внутрішнього запасу тепла, що свідчить про відсутність інтенсивного окиснення коксу. Але дана система охолодження водою не враховує бажані режими руйнування забруднень стічної води, а передбачає лише вирівнювання температур по об'єму шматка коксу.

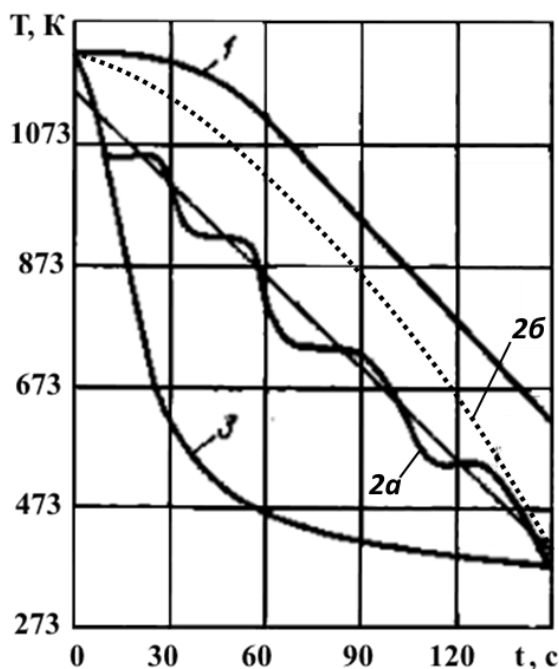


Рис. 1. Зміна температури поверхні та середини шматка коксу за умов мокрого гасіння: 1 – у центрі шматка, 2 – на поверхні при імпульсному подаванні води, 3 – на поверхні при одностадійному подаванні води, 2а – стандартний режим, 2б – запропонований режим

За даними (рис. 1) можна побачити, що інтенсивність охолодження поверхні шматка коксу за одностадійного подавання води значно більша, ніж за технології імпульсного гасіння, хоча зміна температури серцевини шматка має близьку залежність. Але в умовах імпульсного подавання час взаємодії води з поверхнею коксу, а також час для відстоювання гасильного вагону після завершення подавання води будуть меншими, що компенсує більш тривалий період гасіння. Водночас меншає кількість тріщин у коксі та їх глибина, менше поглинається волога пористістю коксу, оскільки вода не встигає просочувати шматок вглиб, збільшується ступінь руйнування фенолів, досягається зменшена інтенсивність крапельних опадів внаслідок меншого об'єму парогазової хмари за менших витрат води.

Для поверхні шматка коксу можна оцінити характеристики теоретичного стадійно-імпульсного режиму охолодження водою за принципом «подача-пауза», за якого внутрішні шари коксу встигнуть передати накопичене тепло до поверхні шматка і наступний імпульс водяного струменю потрапить на поверхню шматка з максимально можливою усередненою температурою. При цьому існує достатньо малий час контакту розжареної поверхні шматка коксу з водою, за якого внутрішні термічні напруження всередині шматка не перевищують критичних значень.

Припинення подавання води між імпульсами не означає, що у цей проміжок

часу виникне окиснення та вигорання карбонізованої поверхні шматка коксу, оскільки протягом цієї паузи газовий простір гасильного вагону виявляється наповненим негорючою водяною парою, що викликає явище флегматизації процесу горіння [2]. За таких умов можна на певному температурному інтервалі процесу мокрого гасіння коксу сформувати режим охолодження без формування стоку, тобто з повним випаровуванням. З цього приводу необхідно зауважити, що водяна пара теж має охолоджуючу здатність. При цьому час гасіння значно не збільшиться, а витрата води зменшиться.

Пропонуємо змінити тривалість періодів подавання води в кожному імпульсі для наближення залежності зменшення температури поверхні шматка коксу до залежності зменшення температури середини шматка (рис. 1, крива 1). Водночас передбачається у періоди достатньо малих пауз наявність неокисного газового середовища біля поверхонь коксу у вигляді водяного газу або пари води. Для наведеної на рис.1 залежності «2а» наявні температури забезпечують можливість самопідтримування горіння коксу під час перших трьох періодів охолодження, коли температура поверхні шматка перевищує 500 °С, причому внутрішня температура шматка становить близько 700 °С.

З теорії гасіння пожеж різних класів розпиленням та компактним струменем води відомо [2, 14, 15], що для повної реалізації власної охолоджувальної здатності вона має пройти 3 етапи нагрівання, під час яких буде поглинати тепло за рахунок теплоємності рідкого стану в інтервалі температур нагрівання до температури кипіння води, за рахунок теплоти випаровування та теплоємності парового стану води в інтервалі температур нагрівання до температури зони горіння (у випадку мокрого гасіння їй буде відповідати температура поверхні шматка коксу):

$$q_{\text{погл}} = 0,7c_p^{\text{рід}}(80 - t_o) + 0,55\Delta H_{\text{вип}} + 0,4c_p^{\text{пар}}(t_{\text{гор}} - 80), \text{ кДж/кг}, \quad (1)$$

де $c_p^{\text{рід}}$, $c_p^{\text{пар}}$ – масові теплоємності води у рідкому та пароподібному стані, 4,2 та 1,96 кДж/кг К, відповідно; $\Delta H_{\text{вип}}$ – теплота випаровування води, 2260 кДж/кг [16]; 80 °С – середня температура пароутворення; 0,7, 0,55, 0,4 – емпіричні значення часток від загальної кількості води, що повністю приймає участь у даному етапі відбору тепла.

Під час пожежогасіння ставлять завдання максимально повно використовувати ці теплові процеси, оскільки вода, яка не встигла випаруватись та стікає далі використовує власну здатність до поглинання тепла лише на 2–10 %. Тому навіть виявляється гасіння теплою водою більш ефективним, бо вода встигає випаруватись та пройти усі стадії відбору тепла. Для гасіння полум'яного горіння розпиленою водою виявляється, що перша стадія відбору тепла поглинає близько 10 % тепла від отриманої охолоджуючої здатності, друга – близько 50 %, третя – до 40 %.

Якщо під таким кутом зору розглянути процес мокрого гасіння, то середня температура води, що стікає у відстійник становить 45 °С, також приймемо, що вода нагрівається не до 80 °С, а до 100 °С, а пара встигає нагрітись до 300 °С, то охолоджуюча здатність 1 кг води під час стандартного режиму одностадійного мокрого гасіння з врахуванням втрат у вигляді пари 10 % буде становити: $q_{\text{погл}} = 0,9 \cdot 4,2(45 - 20) + 0,1(4,2(100 - 20) + 2260 + 1,96(300 - 100)) = 393,3 \text{ кДж/кг}$ (на підставі залежності (1)), з яких 94,5 кДж/кг надає вода, що протекла у відстійник – 90 % від поданого обсягу. Вода, що встигла перейти у пару, зможе поглинути

265,2 кДж/кг, що становить 67,4 % ефективності води по відношенню до охолодження маси коксу. Водночас максимальна охолоджуюча здатність води без втрат забезпечує поглинання $q_{\text{погл}}=4,2(100-20)+2260+1,96(300-100)=2988,0$ кДж/кг тепла. Відносно такого розрахунку вода під час стандартного одностадійного мокрого гасіння реалізує власну охолоджуючу здатність лише на 13,2 %, при цьому головну частину ефекту охолодження – 75,6 % забезпечує процес випаровування та подальшого нагріву води.

Наведена оцінка показує, що процес подавання стічної води на мокре гасіння коксу необхідно влаштувати таким чином, щоб її максимальна кількість перейшла у пару. Це дозволить зменшити витрату води на гасіння у 7,5 рази. Це означає, що повний час застосування імпульсних струменів також необхідно зменшити у 7,5 рази. Якщо прийняти час одностадійного гасіння водою 120 с, то повний час імпульсного подавання без втрат буде достатнім у кількості 16 с, з втратами – оцінімо як 30 с.

За основу організації імпульсного гасіння водою шматка коксу приймемо достатню умову для охолодження його поверхні, для чого вистачає часу подавання води 1–2 с; близько 5 с буде відновлюватись та усереднюватись температура поверхні за рахунок тепла внутрішніх шарів коксу, а також – зберігатись флегматизуюче середовище в об'ємі гасильного вагону. Але для створення флегматизуючого середовища у всьому об'ємі коксу необхідний або більший час подавання для потрапляння води у нижні шари насипу коксу, або вдосконалити конструкцію вагону для можливості вприскування води у середні та нижні шари насипу.

Перша порція стічної води, що подається на гасіння, спрямована в першу чергу на те, щоб зафлегматизувати об'єм гасильного вагону за рахунок витискання повітря та створення неокисного газового середовища на основі водяної пари та інших газів. За умови рівномірно вприскування води в об'єм купи зі зрошуванням усіх поверхонь мінімальний час імпульсу водяних струменів становить 2 с. Це має зменшити вихідну температуру поверхні шматка коксу 950 °C на 25 °C. Пауза в 10 с передбачає достатність для відсутності загоряння коксу, час на вирівнювання температур в об'ємі шматка коксу, нагрів до максимальної усередненої температури газового середовища. Температура поверхні шматка за рахунок внутрішніх гарячих шарів коксу зростає до температури незначно меншої від початкової. З огляду більшу інтенсивність дифузії для більших температур газів перші паузи між подаванням води можна робити меншими. Тоді режим імпульсного зрошення як «час подавання-пауза» буде наступним, с: 2–5, 2–6, 2–7, 1–8, 1–9, 1–10, 1–11, 1–12, 1–13, 1–14, 1–15. При цьому перші 60 с охолодження здійснюються концентрованою стічною водою, другі 60 с – розбавленою. Таким чином, час подавання води протягом 1-ї хв складе 9 с, 2-ї – 4 с, що обумовлює рівномірне охолодження шматка коксу без виникнення термічних напружень та ліквідування стічної води. Через 2 хв такого режиму подавання води температура поверхні коксу знижується до 450 °C, що достатньо для гарантування відсутності загоряння (але ще залишається можливість самозаймання за накопичення тепла окиснення у купі [2, 14]).

На 3 етапі, коли температура коксу вже не забезпечує руйнування домішок, продовження його імпульсного охолодження здійснюється вже технічною водою протягом 6 циклів за принципом «подача-пауза» за схемою, с: 1–15, що складе 96 с. Тобто загальний час імпульсного гасіння в означеному режимі становить 219 с (3,65 хв), а загальний час подавання води – 19 с (при цьому немає необхідності відстоювання гасильного вагону). Стандартне гасіння з відстоюванням вагону для

стікання води становить до 190 с (3,2 хв), тобто час близький. Надалі кокс за стандартною процедурою скидається з гасильного вагону на рампу для завершення охолодження, контролю випадків самозаймання та для досушування.

7. Обговорення результатів дослідження розробки імпульсного режиму мокрого гасіння металургійного коксу

Проведений аналіз температурних та хімічних умов, а також розрахунок охолоджуючої здатності води під час мокрого гасіння металургійного коксу дозволили розробити схему імпульсного подавання води з більш ефективним її застосуванням за багатьма техніко-екологічними параметрами процесу. А саме – підвищена глибина знешкодження домішок стічної води, яку використовують для гасіння, досягнуто менші термічні напруження у шматку коксу з отриманням більш міцного цільового продукту, досягнуто зменшення витрати води на гасіння, досягнуто зменшення забруднення навколишнього повітряного простору, показано можливість отримання менш вологого коксу, а також – енергетичного ефекту шляхом використання тепла коксу і теплоти згоряння водяного газу, що утворюється на першій стадії запропонованого режиму гасіння. Позитивний результат проведеного дослідження отримано за рахунок добору інтервалів «подавання-пауза» під час зрошування розжареного коксу у гасильному вагоні водою, що забезпечило зміну профілю зменшення температури поверхні шматка коксу.

Обраний підхід на відміну від поширених базувався не лише на завданні зменшити термічні напруження у шматку коксу, а й на забезпеченні за умов подавання води мінімально достатнього флегматизуючого (негорючого) газового середовища в об'ємі гасильного вагону, на сповільненні охолодження поверхні шматку коксу для подовження наявності високотемпературних умов для розкладання домішок стічних вод навіть за їх високих концентрацій, на забезпеченні достатніх пауз між імпульсами подавання води для вирівнювання температури поверхні відносно температури середини шматка. Таким чином, обраний підхід дозволив вирішити завдання з розробки ефективної, економічної та екологічної технології мокрого гасіння металургійного коксу у більш широкому комплексі вимог.

За прийнятою методикою імпульсного мокрого гасіння коксу час подавання води має охолодити поверхню більшості шматків у насипу коксу, але головне – кількість водяної пари, що утворюється повинна зафлегматизувати газовий простір забезпечити відсутність контакту розжареної поверхні коксу з киснем повітря (флегматизуюча концентрація негорючого газу – це така, за якої не підтримується самовільний розвиток горіння [2, 17]). У паузі між імпульсами у шматку коксу має вирівнятися температура, і до цієї ж температури має нагрітися водяна пара для максимальної реалізації охолоджуючої здатності. Тоді наступний імпульс подавання води має затриматись на відповідний час. Тобто потреба у збільшенні стандартних інтервали між імпульсами подавання води визначається часом на її нагрів, випаровування та нагрів пари до максимально можливої температури, що використовується для підвищення ефективності водяного пожежогасіння [14, 18]. Для максимального використання охолоджуючої здатності води її більшу кількість необхідно подавати в середину купи коксу у гасильному вагоні, щоб пара продовжувала грітися та відбирати тепло від коксу. Для цього необхідна модернізація гасильного вагону з можливістю вприскування розпорошеної води у внутрішні шари розжареного коксу через стінки вагону або іншим шляхом. Крім того, таке подавання буде подовжувати шлях водяної пари крізь розжарений кокс, що

буде сприяти нагріву пари до більшої температури та більш повній реалізації охолоджуючої здатності води.

За такого подавання збільшується глибина та ефективність знешкодження забруднень стічної води, виникає можливість подавати на гасіння перші порції без розбавлення технічною водою та повністю ліквідувати масу стоку. Парогазове окиснення фенолів буде тривати за температур поверхні шматка коксу більших за 800 °С. Така умова виконується на 1 етапі, тобто протягом 1-ї хв гасіння та 7 циклів охолодження. Ліквідація стічної води та її домішок за таких умов відбувається з одночасним утворенням за контакту з карбоновою поверхнею коксу горючого водяного газу розширеного складу, який можна використовувати для енергетичних цілей (причому енергетична ефективність буде підвищеною внаслідок гарячого стану газів). За високих температур коксу будуть руйнуватися й смоли та масла, які за у менших температур утворюють на поверхнях шматків коксу плівку, що заважає доменному процесу. Тобто, можна позбутися стадії підготовки стічної води для мокрого гасіння у вигляді очищення від смол та масел.

На 2-му етапі протягом 2-ї хвилини гасіння відбуваються наступні 4 цикли охолодження по 1 с, коли фенол вже окислюється повільно, водяний газ теж вже утворюється не інтенсивно. Тому в цей період можливо подавати лише очищені на біохімічній установці заводу стічні води, які ще не можна скидати у водойми та які потребують доочищення на міських біопрудах. На цьому етапі кокс охолоджується до температури нижче за його температуру самонагрівання, коли гарячий кокс вже не має схильності до самовільного підвищення температури; що відноситься до області температур менших ніж 500 °С. За цей час надходить 1,7 м³ води. При цьому близько 50 % вмісту фенолів переходить у пару. Якщо їх концентрація у воді була 0,15 г/дм³, то у повітря перейде 128 г, проти 3750 г за звичайного гасіння, тобто викид фенолів зменшується приблизно у 30 разів.

Так, якщо вихід коксу з печі становить 13 т, то на його гасіння звичайним методом йде близько 50 м³ води; в імпульсному режимі подавання буде витрачено близько 8 м³ води. З них 4 м³ – є повністю ліквідований обсяг не очищеного стоку, 2 м³ – води після біохімічної установки, змішаної з технічною; 2 м³ – технічної. З 50 м³ води для одностадійного мокрого гасіння у пару переходить близько 6 м³. Якщо вміст стічної та технічної води у суміші був 50/50 %, то у пару перейшло 3 м³ технічної води; її втрати при імпульсному гасінні будуть аналогічними.

Таким чином, розроблена схема імпульсного подавання стічної води на мокре гасіння коксу значно підвищить ступінь деструкції фенолів, повністю ліквідує частину забрудненого стоку та його домішки. За запропонованим режимом подавання води її витрата зменшується у 6,25 рази, досягаються знешкодження стічної води, а втрати технічної води відповідають стандартній методиці гасіння. Для енергетичного використання гарячого водяного газу потрібна технологія його відбору у комплексі з певною енергетичною установкою. Водяний газ, який утворюється, за умови направлення на спалювання у гарячому стані дасть більшу температуру горіння та ефективність парової турбіни у разі його використання для отримання електроенергії.

За відомим досвідом впровадження імпульсного гасіння коксу – нераціонально робити імпульсну подачу за рахунок перемикання двигуна. Пропонуємо систему з керованим клапаном в об'ємі, що знаходиться під тиском.

Результати дослідження необхідно уточнити на повномасштабній установці, що передбачає уточнення тривалості імпульсів подавання води та пауз для підвищення ефективності деструкції домішок стічної води, встановлення концентрацій

домішок, які можна знешкоджувати за розробленого механізму, встановлення зміни елементного складу коксу під час руйнування окремих сполук на його поверхні.

З небезпек розробленої технології необхідно відмітити те, що за утворення водяного газу можливо досягнення його вибухонебезпечних концентрацій у повітрі за відсутності системи відбору, що потребує моніторингу та, можливо системи запобігання запалювання (флегматизація негорючим газом або розбавлення повітрям до негорючого стану). Також відмітимо, що за умови інтенсивного утворення водяного газу буде витрачатися на реакцію частина поверхневого карбону коксу. Тим не менш, саме енергетичне використання водяного газу є перспективним напрямом розвитку даної технології.

Таким чином, розроблена технологія представляє інтерес у багатьох напрямках: підвищення якості коксу внаслідок менших розтріскування, вмісту сірки та вологи (вода менше встигає просочуватись у внутрішні шари шматка), більша ефективність знешкодження стічної води, менше забруднення атмосфери, можливість отримання додаткового енергетичного ефекту за поєднання теплоти розжареного коксу та теплоти згоряння водяного газу.

8. Висновки

1. Визначено основні забруднювачі для стічної води, яка використовується для мокрого гасіння коксу, концентрації яких мають контролюватися у самій воді та у повітряному просторі біля башти гасіння: HCN , $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, H_2S , NH_4^+ , SCN^- , SO_2 (у повітрі). Основними реакціями їх знешкодження є термодеструкція та парогазове окиснення, водночас можливі деякі реакції синтезу, а також горіння коксу. Визначено температурні інтервали для поверхні шматка коксу, у яких відбуваються цільові реакції руйнування домішок стічної води та утворення водяного газу під час мокрого гасіння коксу: вище за 800°C , до 500°C , до 250°C , нижче за 250°C . Визначено 4 відповідні етапи мокрого гасіння коксу: стічною водою, розбавленою стічною водою, технічною водою, завершення гасіння та охолодження на рампі. Перші два етапи дозволяють ліквідувати стічні води та утворювати водяний газ.

2. Встановлено, що для одночасного вирішення двох задач – підвищення ефективності руйнування домішок стічних вод під час мокрого гасіння та зменшення термічних напружень у шматку коксу – необхідно сповільнити процес охолодження поверхні шматка та зменшати інтенсивність перепадів температур, а також обов'язковим завданням залишається забезпечення флегматизації паром води газового середовища у гасильному вагоні біля поверхонь розжареного коксу. Означені завдання вирішено за рахунок розробки наступної схеми імпульсно-періодичного подавання води «подавання-пауза», с: 2–5, 2–6, 2–7, 1–8, 1–9, 1–10, 1–11, 1–12, 1–13, 1–14, 1–15, 1–15, 1–15, 1–15, 1–15, 1–15, 1–15; при цьому 1 хв подається нерозбавлена стічна вода, 1 хв – розбавлена, 1,65 хв – технічна; загальним час гасіння становить 219 с, у тому числі подавання води – 19 с. Досягнуто збільшення міцності коксу, зменшення утворення шламу, зменшення вмісту сірки та вологи.

Література

1. Мирошніченко І. В., Фатенко С. В., Мірошніченко Д. В., Шульга І. В. Розширення сировинної бази коксування та поліпшення властивостей коксу як доменного палива: монографія. Харків–Тернопіль: Крок, 2022. 254 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/6b3cab3a-0be1-4c1e-81f3-6024265bf54e>
2. Трегубов Д., Дадашов І., Мінська Н., Гапон Ю. Чиркіна-Харламова М. Фі-

зико-хімічні основи розвитку та гасіння пожеж горючих рідин. Харків: НУЦЗ України, 2024. 216 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19111>

3. Shulga I. V., Miroshnichenko I. V., Ryshchenko I. M., Miroshnichenko D. V. Moisture content of wet-quenched coke. *Coke and Chemistry*. 2019. № 62(9). P. 402–407. doi: 10.3103/S1068364X19090084

4. Трегубов Д. Г., Тарахно О. В., Шаршанов А. Я. Прогноз ефективності флегматизації горючих систем кисневмісними сумішами. *Проблеми пожежної безпеки*. 2015. № 37. С. 228–234. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3196>

5. Fidchunov A. L., Vasil'ev Yu. S., Fidchunov L. N., Shulga I. V. On coke burnout and productivity of the USTK. *Coal Chemical Journal*. 2016. № 2. С. 8–12. URL: https://www.ukhin.org.ua/images/magazine/2016/2_2016/Journal1-2_2016-2.pdf

6. Kwiecińska A., Figa J., Stelmach S. The Use of Phenolic Wastewater in Coke Production. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016. № 25(2). P. 465–470. doi: 10.15244/pjoes/60725

7. Kolomiichenko A. I., Zolotarev I. V., Mostovoi O. N., Kasyun S. I., Toryanik E. I. Producing Coke of Improved Quality. *Coke and Chemistry*. 2017. № 60. 424–428. doi: 10.3103/S1068364X17110035

8. Карпенко О. О., Лазаренко О. Я., Лазаренко Т. В., Ніколайчук Ю. В. Концепція удосконалення ресурсозберігаючих технологій і технологічного обладнання для виробництва коксу з заданими властивостями. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2012. № 7(101). С. 71–76. URL: <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/20409>

9. Strakhov V. M., Kaliakparov A. G., Panfilov V. P. et al. Coke Quality in Medium-Temperature Coking of Fractionated Long-Flame Coal. *Coke and Chemistry*. 2022. № 65. 316–334. doi: 10.3103/S1068364X22080051

10. Скляр І., Пирогов О. Деякі особливості визначення побічних збитків від пожеж. XVI Міжнар. НПК молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності». Львів: ЛДУ БЖД. 2021. С. 108–109. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14924>

11. Трегубов Д. Г., Пономаренко Р. В., Слепужніков Є. Д., Чиркіна М. А. Режими знешкодження стічних вод мікродуговим розрядом у системі з об'ємним електродом. Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій: монографія. Полтава–Львів–Дніпро: Середняк Т. К. 2022. С. 509–519. doi: 10.23939/monograph2022

12. Delort N., Meziane I., Herbinet O., Carstensen H.-H., Battin-Leclerc F. Experimental and modelling study of phenol combustion and oxidation. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2024. № 40. P. 105247. doi: 10.1016/j.proci.2024.105247

13. Maffei L., Pelucchi M., Faravellia T., Cavallotti C. Theoretical study of sensitive reactions in phenol decomposition. *Reaction Chemistry & Engineering*. 2020. № 3. P. 452–472. doi: 10.1039/C9RE00418A

14. Трегубов Д. Г., Мінська Н. В., Гапон Ю. К., Тарахно О. В. Теорія процесів горіння, вибуху та пожежогасіння. Харків: НУЦЗ України, 2024. 422 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20224>

15. Zhun L., Rongwei B., Jiaming Z., Yang Zh. Numerical investigation on fire-extinguishing performance using pulsed water mist in open and confined spaces. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. № 13. P. 100402. doi: 10.1016/j.csite.2019.100402

16. PubChem. Compound summary. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

17. Glassman I., Yetter R. A., Glumac N. G. *Combustion*. London: Elsevier, 2014. 757 p. doi:10.1016/C2011-0-05402-9

18. Христич В., Маляров М., Бондаренко С. Сучасні способи підвищення ефективності гасіння пожежі розпорошеною водою. Проблеми пожежної безпеки. 2016. № 40. С. 201–205. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/2198>

D. Tregubov, PhD, Associate Professor, Professor of the Department

L. Trefilova, DSc, Senior Researcher, Associate Professor of the Department

O. Danyk, Senior Lecturer of the Department

K. Rusenko, Teacher of the Department

V. Mazurov, Cadet

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

USING FIRE EXTINGUISHING EXPERIENCE IN THE METALLURGICAL COKE WET QUENCHING TECHNOLOGY

The metallurgical coke wet quenching technology was improved. An efficiency comparison, cost-effectiveness and environmental friendliness of coke cooling processes after removal from the furnace using wet and dry methods was carried out. These processes similarity to water fire extinguishing and fire quenching with non-flammable gases was analyzed. Attention is focused on wet quenching advantages and disadvantages and this technology improving feasibility. It is argued that coke single-stage quenching has significant thermal stresses in the lump due to a significant temperature excess in the lump middle over the surface temperature, which at the same time reduces the wastewater impurities neutralization efficiency on the coke surface. The theoretical possibility of the wastewater utilization efficiency increasing using wet quenching, reducing water consumption, improving the coke quality as an important blast furnace process component, and reducing the toxic gas contamination area near the quenching tower is shown. It was established that this issues set can be solved by the water supply phasing selecting for quenching in a pulsed mode, which can ensure the coke lump cooling process uniformity. The water cooling capacity theoretical value of the under conditions of the coke standard single-stage wet quenching and under this ability full use conditions was calculated. It was shown that the using water efficiency as a cooling agent increases if it is completely evaporated and the steam is heated to the coke temperature. According to the assessment, the supply time and water consumption are reduced by 7.5 times when its cooling ability is fully utilized. It is proposed to carry out wet quenching in 3 stages: for 1 min – with concentrated wastewater, for 2 min – with diluted wastewater, for 3 min. – with technical water. The intervals system of water supply pulse mode for the coke cooling with a “supply-pause” scheme with a total quenching time of 219 s was developed, of which the total water supply time is 19 s.

Keywords: metallurgical coke, heterogeneous combustion, wet quenching, wastewater, pulse spraying, disposal

References

1. Myroshnychenko, I. V., Fatenko, S. V., Miroshnychenko, D. V., Shul'ha, I. V. (2022). Rozshyrennya syrovynnoyi bazy koksuвання та polipshennya vlastyvostey koksu yak domennoho palyva: monohrafiya. Kharkiv–Ternopil': Krok, 254. Available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/6b3cab3a-0be1-4c1e-81f3-6024265bf54e>
2. Trehubov, D., Dadashov, I., Mins'ka, N., Hapon, Yu. Chyrkina-Kharlamova, M. (2024). Fizyko-khimichni osnovy rozvytku ta hasinnya pozhezh horyuchykh ridyn. Kh.: NUTSZ Ukrayiny, 216. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19111>
3. Shulga, I. V., Miroshnichenko, I. V., Ryshchenko, I. M., Miroshnichenko, D. V. (2019). Moisture content of wet-quenched coke, Coke and Chemistry, 62(9), 402–407. doi: 10.3103/S1068364X19090084
4. Tregubov, D., Tarakhno, O., Sharshanov, A. (2015). Forecast efficiency phlegmatizing combustible systems by oxygen-containing mixes, Problems of Fire Safety, 37, 228–234. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3196>
5. Fidchunov, A. L., Vasil'ev, Yu. S., Fidchunov, L. N., Shulga, I. V. (2016). On

coke burnout and productivity of the USTK, *Coal Chemical Journal*, 2, 8–12. Available at: https://www.ukhin.org.ua/images/magazine/2016/2_2016/Journal1-2_2016-2.pdf

6. Kwiecińska, A., Figa, J., Stelmach, S. (2016). The Use of Phenolic Wastewater in Coke Production. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(2), 465–470. doi: 10.15244/pjoes/60725

7. Kolomiichenko, A. I., Zolotarev, I. V., Mostovoi, O. N., Kasyun, S. I., Toryanik, E. I. (2017). Producing Coke of Improved Quality, *Coke and Chemistry*, 60, 424–428. doi: 10.3103/S1068364X17110035

8. Karpenko, O., Lazarenko, O., Lazarenko, T., Nikolaychuk, Ju. (2012). Conception of improvement of resource-saving technologies and technological equipment is for production of coke with the set properties, *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 7(101), 71–76. Available at: <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/20409>

9. Strakhov, V., Kaliakparov, A., Panfilov, V., Imanbaev, S., Aubakirov, A. (2022). Coke Quality in Medium-Temperature Coking of Fractionated Long-Flame Coal, *Coke and Chemistry*, 65, 316–334. doi: 10.3103/S1068364X22080051

10. Sklyar, I., Pyrohov, O. (2021). Deyaki osoblyvosti vyznachennya pobichnykh zbytkiv vid pozhezh. *Mizhnarodna NPK molodykh vchenykh, kursantiv ta studentiv «Problemy ta perspektyvy rozvytku systemy bezpeky zhyttyediyal'nosti»*. L.: LDU BZHD, 108–109. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14924>

11. Trehubov, D. H., Ponomarenko, R. V., Slepuzhnikov, Ye. D., Chyrkina, M. A. (2022). Rezhymy zneshkodzhennya stichnykh vod mikroduhovym rozryadom u systemi z ob'yemnym elektrodom. *Podolannya ekolohichnykh ryzykiv ta zahroz dlya dovkillia v umovakh nadzvychaynykh sytuatsiy: monohrafiya*. Poltava–L'viv–Dnipro: Serednyak T. K., 509–519. doi: 10.23939/monograph2022

12. Delort, N., Meziane, I., Herbinet, O., Carstensen, H.-H., Battin-Leclerc, F. (2024). Experimental and modelling study of phenol combustion and oxidation, *Proceedings of the Combustion Institute*, 40, 105247. doi: 10.1016/j.proci.2024.105247

13. Maffei, L., Pelucchi, M., Faravellia, T., Cavallotti, C. (2020). Theoretical study of sensitive reactions in phenol decomposition, *Reaction Chemistry & Engineering*, 3, 452–472. doi: 10.1039/C9RE00418A

14. Trehubov, D. H., Mins'ka, N. V., Hapon, Yu. K., Tarakhno, O. V. (2024). *Teoriya protsesiv horinnya, vybukhu ta pozhezhohasinnya*. Kharkiv: NUTSZ Ukrayiny. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20224>

15. Zhun, L., Rongwei, B., Jiaming, Z., Yang, Zh. (2019). Numerical investigation on fire-extinguishing performance using pulsed water mist in open and confined spaces, *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100402. doi: 10.1016/j.csite.2019.100402

16. PubChem. Compound summary. Available at: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

17. Glassman, I., Yetter, R., Glumac, N. (2014). *Combustion*. London: Elsevier. doi:10.1016/C2011-0-05402-9

18. Khrystych, V. V., Malyarov, M. V., Bondarenko, S. M. (2016). Modern how to improve firefighting mist water. *Problems of Fire Safety*, 40, 201–205. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/2198>

Надійшла до редколегії: 20.02.2025

Прийнята до друку: 22.04.2025