



Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>



UDC 632.15

ELECTRONO-CATALYTIC INTENSIFICATION COMBUSTION OF SOLID FUEL

Vitalii M. Viazovyk

Cherkasy State Technological University, blvd. Shevchenko, 460, Cherkasy, Ukraine

Received 15 August 2023; accepted 10 October 2023; available online 25 October 2023

Abstract

Coal is the most available energy resource and its consumption increases every year. Coal reserves, unlike oil and gas, are large. But not infinite. Therefore, there is already a question of creating technologies that would allow reducing the consumption of coal while preserving, and if possible, increasing the amount of energy obtained when burning it. For this, it is proposed to use the directed action of an artificially created low-temperature plasma with an ordered movement of "slow" electrons. A dielectric barrier discharge was used as a source of "slow" electrons. The use of an electrono-catalytic method of intensifying the combustion process of solid fuel allows to increase the output of volatile compounds with a heat of combustion higher than the heat of combustion of compounds, weakens bonds in the crystalline structure of the coke residue and increases the degree of fuel combustion. This makes it possible to reduce coal consumption by up to 20 % with electricity consumption of 25–30 W·h per 1 kg of coal and increase the formation of volatile compounds for anthracite to 13.42 %, for gas coal to 24.9 %.

Keywords: electrocatalysis; burning; intensification; coal; dielectric barrier discharge.

ЕЛЕКТРОННО-КАТАЛІТИЧНА ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ГОРІННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА.

Віталій М. Вязовик

Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченка 460, Черкаси, Україна

Анотація

Вугілля – найдоступніший енергоресурс, і його споживання збільшується з кожним роком. Запаси вугілля, на відміну від нафти і газу, великі, але не безкінечні. Тому вже зараз стає питання про створення технологій, які б дозволили зменшити витрати вугілля в процесі збереження, а, за можливості, і збільшили кількість енергії його спалення. Для цього пропонується використання спрямованої дії штучно створеної низькотемпературної плазми з упорядкованим рухом «повільних» електронів. Як джерело «повільних» електронів використаний діелектричний бар'єрний розряд. Це дозволяє зменшити витрати вугілля до 20 % за витрат електроенергії 25–30 Вт·год на 1 кг вугілля і збільшити утворення летких сполук – для антрацитів до 13.42 %, для газового вугілля до 24.9 %.

Ключові слова: електроннокаталіз; горіння; інтенсифікація; вугілля; діелектричний бар'єрний розряд.

*Corresponding author: e-mail: v.viazovyk@chdtu.edu.ua

© 2021 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v31i3.285955

Вступ

Починаючи з періоду промислової революції, вугілля відіграє важливу роль в паливному балансі планети. На сьогодні його доля серед усіх використаних джерел енергії складає біля 23 %. Вугілля – це найдоступніший енергоресурс, і його споживання збільшується з кожним роком.

Запаси вугілля, на відміну від нафти і газу, великі. Але не безкінечні. Так, за однакових масштабів використання усіх відкритих родовищ, запасів вугілля вистачить на 150 років. Запаси України складають близько 36 млрд тон, що складає лише 3.3 % від світового запасу [1]. Тому вже зараз стає питання про створення технологій, які б дозволили зменшити витрати вугілля в процесі збереження, а, за можливості, і збільшені кількості енергії його згорання.

Однією з основних задач у проектуванні парових котлів ТЕЦ є вибір оптимальної технологічної схеми спалювання палива. Дуже часто від правильності прийнятого рішення залежить робота не тільки топки, а і ТЕЦ в цілому. Проекти нових і реконструйованих ТЕЦ повинні передбачати ефективні способи зменшення викидів токсичних сполук в навколишнє середовище і підвищення ефективності спалювання палива.

Тому метою даного дослідження була розробка технологій інтенсифікації первинних ендотермічних стадій реакції горіння твердого палива, які базуються на використанні спрямованої дії штучно створеної низькотемпературної плазми з упорядкованим рухом «повільних» електронів. Як джерело «повільних» електронів використовувався діелектричний бар'єрний розряд.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені такі задачі:

1. Створення наукової концепції протікання первинних ендотермічних стадій горіння твердого палива в присутності низькотемпературної плазми за електронно-каталітичним методом.

2. Дослідження процесів горіння твердих палив з використанням електронно-каталітичного методу.

Теоретичні основи. Звичайне горіння твердого палива.

Процес горіння палива можливо розділити на ряд стадій. Для твердого палива ці стадії наступні: підігрів, випаровування вологи, возгонка летких сполук і коксоутворення,

горіння летких сполук, горіння коксу, утворення шлаку.

Тривалість окремих стадій значною мірою залежить від властивостей палива. Для дуже вологого палива стадія прогріву і підсушки порівняно тривала. Горіння коксу відбувається значно довше, ніж возгонка і горіння летких сполук, навіть у палив з високим вмістом летких сполук.

Тверде натуральне паливо містить вуглець, велику кількість різноманітних вуглеводневих сполук, вологу, золу тощо. За нагрівання, ще до досягнення температури запалення частинки, відбувається термічне розкладання органічної маси палива з виділенням летких речовин, в склад яких входить значна кількість горючих компонентів, таких як метан, водень, карбон (II) оксид і т. д. Вони значною мірою визначають умови запалення і горіння натурального палива. Після виділення летких сполук залишається твердий кокс, який складається з карбону [2; 3].

Основною властивістю твердого палива є його здатність за нагрівання виділяти продукти термічного розкладання органічної маси (леткі сполуки). До складу летких сполук можуть входити різноманітні органічні смоли (від 2–6 % для напівантроциту до 20.2 % для торфу), вода розкладання (від 1 % для напівантроциту до 24.7 % для торфу), газ (від 10–14 % для напівантроциту до 26.5 % для торфу і 26 % для бурого вугілля). Деякі торфи містять і кислоти [4].

Процес термічного розкладання окремих складових палива являє собою розрив зв'язків в цих складових з утворенням багаточисельних нестійких активних проміжних продуктів. Останні дуже швидко реагують між собою, в результаті чого утворюються стійкіші продукти термолізу: смоли, кислоти, гази, що не конденсуються, та інші сполуки.

Вихід і горіння летких сполук найчастіше випереджає горіння коксу, бо леткі сполуки, які видаляються з поверхні часток палива, протидіють дифузії окиснювача у поверхню коксу. Однак, в залежності від розміру та умов їх обтікання потоком в примежовому шарі, можуть створюватися різні концентрації летких сполук. У дрібних чи крупних частинок на ділянках поверхні з інтенсивною зовнішньою дифузиею інтенсивність виходу потоку летких сполук з поверхні часток менше інтенсивності їх відводу з примежового шару. Концентрація летких сполук в цьому шарі дуже мала. Водночас

виникає можливість доступу окиснювача до поверхні коксу і його горіння, причому горіння летких сполук відбувається в об'ємі факелу між частками.

У крупних частинок леткі сполуки, які виділяються з їх поверхні, утворюють в примезовому шарі оболонку горючої суміші з, власне, них самих та окиснювача. Ця оболонка і запалюється в момент, коли створюються сприятливі умови. Потім леткі сполуки продовжують дифундувати з частинки палива до поверхні горіння, яка утворилася. До цієї ж поверхні підходить і вступає в реакцію кисень із зовнішнього середовища. Протягом деякого часу леткі сполуки, що виходять зі шматка палива, утримують поверхню горіння на певній відстані від поверхні частки, не допускаючи кисень до реакції з коксом.

Горіння вуглецю коксового залишку – гетерогенний процес, який визначається як кінетикою горіння (на поверхні чи в глибині) вуглеводного масиву частки, так і дифузійним перенесенням кисню і продуктів спалювання до поверхні частки, що горить. На кінетику горіння великий вплив чинить структура вуглеводного матеріалу частинки твердого палива.

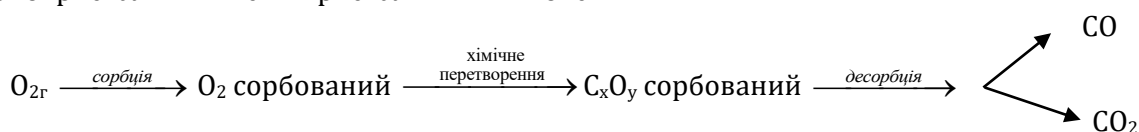
Коксовий залишок за своїм складом є практично чистим вуглецевим матеріалом і за структурою близький до графіту – полікристалічного матеріалу, поверхня якого утворена різноманітними кристалографічними поверхнями; розміри кристалітів коливаються від десяти до десятків тисяч ангстремів. Кристалографічними дослідженнями коксу встановлено, що він має кристалічні включення і навіть окремі монокристали. Вміст кристалітів в коксі

залежить від температури коксування і збільшується зі збільшенням температури процесу. Аналогічно на кристалічні включення впливає і геологічний вік палива.

Разом з мікрокристалічною неоднорідністю паливо має і інший вид неоднорідності – поруватість. Вуглецева поверхня має велику поверхню мікротріщин і пор різноманітної форми і розміру. Нерівномірність, шорсткість і поруватість структури поверхні є наслідками відсутності чіткої кристалічної структури вуглецю палива.

В процесі гетерогенного горіння вуглецю реакція протікає на його поверхні, до якої надходить кисень із навколишнього середовища. Існує велика кількість результатів досліджень взаємодії вуглецю з киснем та іншими газами за різних температур і концентраціях окиснювача. Зараз вважається, що взаємодія вуглецю з окиснювачем (кисень, вуглекислий газ, пара води) протікає за участю проміжних нестабільних часток, які на протязі більш чи менш тривалого часу знаходяться в адсорбованому стані на зовнішній поверхні пор. Таким чином, взаємодія йде через утворення адсорбованого шару газу на вуглецевій поверхні.

Взаємодія вуглецю коксової частки з киснем в процесі хемосорбції супроводжується утворенням оксидів карбону (II), (IV). Однак кисень ніколи не сорбуватися в чистому вигляді. Сорбційний механізм взаємодії кисню з вуглецем може бути представлений в вигляді наступної схеми:



Атоми кисню, які знаходяться близько вуглецевої поверхні, адсорбуються на поверхні і утримуються на ній за рахунок хімічних сил. Водночас відбувається глибоке об'єднання атомів Оксигену і Карбону з утворенням складних гіпотетичних сполук типу C_xO_y . Ці сполуки розкладаються по проходженні деякого часу з виділенням CO і CO_2 . За високої вологості палива, що спалюється, коли в продуктах згоряння може знаходитися значна кількість водяної пари, чи за окиснення вуглецю водяною парою в первинних продуктах можуть з'явитися водень і метан. За одночасного отримання

ряду первинних продуктів існує можливість взаємодії вуглецю з декількома окиснювачами. Таким чином, для горіння вуглецю характерно різноманіття реакцій.

Особливості дії бар'єрного розряду на процеси горіння. Бар'єрний розряд складається з великої кількості мікророзрядів. У зоні кожного мікророзряду утворюється високоенергетична зона, енергетичні параметри якої значно вищі, ніж необхідно для ініціювання процесу горіння палива. Регулювання кількості енергії, яка йде на інтенсифікацію горіння, можливо здійснювати напругою і часом перебування

молекули в цій енергетичній зоні. Електрони, що рухаються до аноду, залишають за собою позитивні іони, які, рухаючись до катоду, також іонізують (хоч і з меншою ефективністю) нейтральні атоми і молекули. Стикаючись з катодом, позитивні іони вибивають з нього електрони, які, потрапляючи в об'єм, також стають причиною іонізації. Ще одним джерелом вторинних електронів є світіння розряду. Воно утворюється завдяки збудженню атомів і молекул електронами та їх наступному переходу в більш низький стан з випромінюванням. Випромінювання розряду може вибивати електрони з катоду, створюючи вторинний фотострум.

За близьких іонізацій вторинної лави, електрони втягуються полем в позитивно заряджений слід іонів, цим викликаючи нові збудження атомів і молекул.

Згідно з теорією бар'єрного розряду, за одну секунду на одиницю площі поверхні утворюються тисячі мікророзрядів [6–10]. Тому описаний процес протікає постійно.

Дія електроннокаталізу на процес горіння твердого палива. Як вже згадано раніше, за нагрівання до температури нижчої, ніж температура запалення частинки твердого палива, відбувається термічне розкладання органічної маси палива з виділенням летких речовин, в склад яких входить значна кількість горючих компонентів, таких як метан, водень, оксид карбону (II) і т.д. Вони значною мірою визначають умови запалення і горіння натурального палива. Після виділення летких сполук залишається твердий кокс, який складається з вуглецю.

Розглянемо більш детально вплив процесу нагрівання вугілля на утворення летких і смолистих речовин у присутності електричного розряду.

В умовах повільного нагрівання початок розкладання органічної маси у кам'яного вугілля починається в інтервалі температур 300–550 °С, для бурого вугілля – за 170 °С. Формування твердої фази протікає в декілька ступенів. На першій стадії прогріву (300–500 °С) виділяються низькомолекулярні речовини, які в своєму складі зберігають структурні форми вуглецю, характерні для зародків вугілля. На другій стадії (до 600 °С) відбувається глибока деструкція речовини вугілля і «зароджуються» первинні двовимірні кристалізаційні центри, які

переходять в більш крупні шари циклічної полімеризації [5–7].

На третій стадії (580–700 °С) формуються невеликі вуглецеві блоки. За температур вище 800 °С протікають процеси асоціації окремих блоків в крупні вуглецеві системи. Стадія горіння коксу починається за температури вище 1400 °С.

По мірі нагрівання вугільної речовини виникає ендо- і екзотермічний ефекти, дія яких і положення на температурній шкалі залежить від швидкості нагріву.

За швидкого нагрівання вугілля (тепловому ударі) вихід летких сполук дуже сильно відрізняється від виходу летких сполук за поступового нагрівання. Так, за швидкого нагрівання вугільної частинки зі швидкістю 10^3 – 10^5 К/с [2] спостерігалось збільшення виходу летких сполук в 1.2–1.8 разів. За цих умов виділяється приблизно 80–95 % летких сполук, а ті, що залишилися в вугіллі, виділяються повільно і згоряють одночасно з коксовим залишком та можуть залишатися в коксовому залишку до температури 1900 °С.

Так, в процесі згоряння летких сполук виділяється приблизно 40 % від загальної кількості тепла згоряння палива.

Так протікає процес виділення летких сполук у звичайному процесі горіння, який не був поєднаний з електронно-каталітичним процесом.

Використання електронно-каталітичного способу інтенсифікації процесу горіння твердого палива дозволяє підвищити вихід летких сполук, в тому числі теплою згоряння з вищою, ніж теплота згоряння сполук, які утворилися за звичайного термолізу. Крім того, використання електроннокаталізу приводить до утворення летких сполук за значно менших температур, що дозволяє використовувати надлишок тепла, який утворився, на цільові потреби.

Під дією температурних неоднорідностей та електричного розряду відбувається руйнування таких складних речовин як смоли, органічні кислоти та інші складові вугілля, на більш легкі сполуки. Також під дією електричного розряду інтенсифікується процес горіння – завдяки більшій швидкості реакцій, простішим речовинам й інтенсивнішому дифузійному обміну. Вплив електроннокаталізу на процес горіння газоподібного палива наведено в [11–15].

Наступною стадією горіння твердого палива є горіння самого коксу, який складається з чистого вуглецю полікристалічної структури, поверхня якої утворена різноманітними кристалографічними поверхнями. В присутності електроннокаталізу крім звичайного процесу горіння вуглецю відбувається процес «трясіння» кристалічної структури коксу, розриву зв'язків між кристалами, що, в свою чергу, покращує процес масообміну кисню і продуктів згорання. Проходження мікророзрядів крізь цю кристалічну структуру послаблює зв'язки в ній, що створює оптимальні умови для процесу горіння коксового залишку та підвищує ступінь вигорання палива. Коливання високої частоти, які виникають під час проходження мікророзрядів, вступають в резонанс із коливанням зв'язків в кристалічній структурі коксового залишку, руйнують їх і сприяють більш легкому окисненню вуглецю. Це підвищує ступінь вигорання палива і виділення тепла на цільові потреби.

На зв'язки кристалічної структури коксового залишку впливає безпосередньо і сам електрон електричного розряду. Так, під час удару електроном по вуглецю кристалічної структури, з нього вибивається ще електрон, що, в свою чергу, послаблює міцність зв'язків кристалічної структури коксового залишку і полегшує його руйнування. Також цьому сприяє заряд електрону. Електрон має досить високий запас енергії, достатній для переведення атома Карбону в збуджений стан, що сприяє вступу його до хімічної реакції.

Також деструктивну дію чинять постійні стрибки температури, які виникають завдяки температурній неоднорідності бар'єрного розряду. Ці постійні стрибки, як і коливання високої температури, руйнують зв'язки в кристалічній структурі, утворюють дрібніші структури коксового залишку, які значно полегшують дифузії кисню до вуглецю і збільшують швидкість вигорання вуглецю коксового залишку.

Так само, як і на окиснення газоподібного палива, електричний розряд впливає на дифузійні процеси в середині зерна твердого палива. Він інтенсифікує дифузії кисню в зерно палива і виведення продуктів горіння.

Розглянутий процес дійсний для усіх видів вугілля. Його можливо використовувати як для кам'яного вугілля, так і для бурого вугілля, й торфу. Тільки за використання

даного процесу для бурого вугілля виділяється значно більше летких сполук.

За накладанні електричного розряду на полум'я, під дією електромагнітного поля і потоку електронів відбувається спрямований рух позитивно заряджених частинок, які утворюються в полум'ї. Під дією електронів кількість катіонів збільшується. Дія цього спрямований рух йонізованих часток (завдяки більш інтенсивному руху частинок, зміни поверхні контакту) збільшує швидкість процесу горіння. Водночас змінюється форма полум'я – від трикутного до трапецевидного (що було висунуто в якості гіпотези Е. М. Степановим в [16]).

Під дією електромагнітного поля електричного розряду збільшується інтенсивність дифузійних процесів на поверхні каталізатору завдяки більш інтенсивному дрейфу часток. Тому збільшується швидкість дифузії, коефіцієнти і швидкості масопередачі, тощо. Оскільки даний процес лімітується дифузійними процесами, то завдяки вказаній інтенсифікації відбувається збільшення загальної швидкості процесу окиснення.

Крім дії мікророзрядів присутня дія випромінювання. Під дією випромінювання відбувається активація молекул газової фази, утвореної внаслідок мікророзрядів і деструктивної дії випромінювання на органічні сполуки вугілля і на саму структуру коксового залишку. Під дією випромінювання утворюється також атомарний кисень – за рахунок руйнування кисневмісних молекул газів, що виділяються з вугілля (H_2O , CO і CO_2) і з молекул кисню повітря, присутніх за активації вугілля. Атомарний кисень ініціює процес окиснення летких сполук.

Випромінювання під час горіння коксового залишку також суттєво впливає на процес теплообміну, а значить, і масообміну кисню та продуктів згорання, залишкових летких сполук. Це випромінювання вільно проходить через приміжовий шар газів, що виділяються з коксового залишку, що ослаблює конвективний теплообмін і підвищує температуру в середині зерна вугілля. Це також збільшує швидкість масообміну газів з поверхнею зерна вугілля і інтенсифікує процес горіння.

На згорання летких сполук впливає концентрація кисню в зоні згорання. Завдяки мікророзрядам і випромінюванню концентрація активного кисню збільшується, що, в

свою чергу, зменшує тривалість запалення вугілля, насамперед летких сполук.

Крім того, концентрація кисню суттєво впливає на тривалість стадії розігріву коксового залишку вугілля. Так, збільшення концентрації кисню на декілька відсотків може зменшити час запалення коксового залишку до 20–25 %.

Усі перераховані фактори сприяють інтенсифікації процесу горіння твердого палива за рахунок виділення більшої

кількості летких сполук і повнішого вигорання коксового залишку.

Методики дослідження

Експерименти по оптимізації горіння твердого палива (кам'яного та бурого вугілля) проводили на установці (рис.), яка складається з котла 1 потужністю 12 кВт, на якому змонтовано керамічну камеру, систему підготовки палива, систему запалювання.

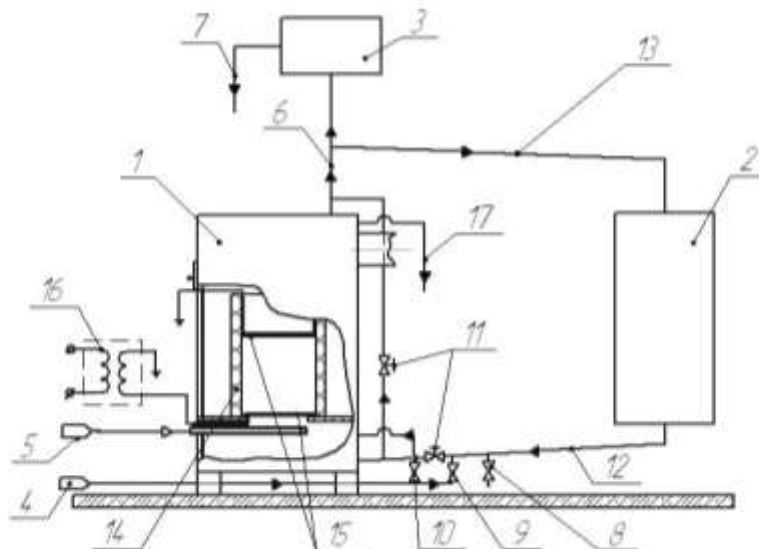


Fig. Scheme of bench installation for optimization of solid fuel combustion. 1 - boiler; 2 - expansion tank; 3 - circulation capacity; 4 - water supply collector; 5 - natural gas collector; 6 - main riser; 7 - overflow line; 8 - drain valve; 9 - system power supply valve; 10 - water supply valve to the heater; 11 - regulating valves; 12 - return pipeline; 13 - straight pipeline; 14 - ceramic chamber; 15 - electrodes; 16 - voltage step up transformer

Рис. Схема стендової установки з оптимізації горіння твердого палива. 1 - котел; 2 - циркуляційна ємність; 3 - розширювальний бачок; 4 - колектор подачі води; 5 - колектор природного газу; 6 - головний стояк; 7 - лінія переливу; 8 - спускний вентиль; 9 - вентиль живлення системи; 10 - вентиль подачі води на підігрівач; 11 - регульовальні вентилі; 12 - зворотний трубопровід; 13 - прямий трубопровід; 14 - керамічна камера; 15 - електроди; 16 - трансформатор, що підвищує напругу

Керамічна камера призначена для зменшення втрат тепла в навколишнє середовище і для попередження виникнення короткого замикання. Для цього на металевий корпус та інші частини котла була нанесена ізоляція з термостійкої кераміки з товщиною шару 10 мм. У нижню частину камери було встановлено систему розподілення газоповітряної суміші запалювання 9.

Система підготовки палива складалася з системи електродів, з яких один – високовольтний, а інший – заземлюючий. На високовольтному електроді розташовується вугілля.

Процес дослідження проводили наступним чином. У камеру підготовки палива (керамічна камера 14) завантажували 1 кг палива з розміром частинок 10–20 мм. Зверху на керамічних опорах на висоті 10 мм

встановлювали заземлюючий електрод 13. Під високовольтним електродом розташовували систему запалювання вугілля.

З моменту запалювання палива вимірювали час нагріву води через кожні 2 °С.

Кожна серія дослідів складалася з нульового (без обробки) дослідів і дослідів з обробкою. Між нульовим дослідом і дослідом з обробкою з метою зменшення похибки дослідів за рахунок неконтрольованої циркуляції води, давали установці повністю захолонуту. Температура запалення для кожного дослідів була постійною і складала 350 °С.

Результати досліджень та їх обговорення.

Для досягнення найбільшого ефекту інтенсифікації процесу горіння твердого палива були проведені дослідження з антрацитом.

Був досліджений вплив напруги на процес досліджень представлені в табл. 1 [21–25].
інтенсифікації горіння вугілля. Результати

Table 1

The results of the investigation of the intensification of the combustion of solid fire

Таблиця 1

Результати досліджень інтенсифікації горіння твердого палива					
№ п.п.	Кількість електродів	Напруга, кВ	Середнє значення підвищення виділення тепла, %	Зміни ступеню вигорання палива, %	Примітки
1	Два	8	7.64	Зменшилася на 25 %	Повний час обробки
2	Один	8	8.56	Зменшилася на 16 %	Повний час обробки
3	Один	4	20.13	Збільшилася на 32 %	Повний час обробки
4	Один	2.8	7.18	Збільшилася на 24.9 %	Повний час обробки
5	Один	2.8	11.05	Збільшилася на 30 %	Час обробки 2100 с

Як було встановлено в процесі дослідження, на процес інтенсифікації процесу горіння твердого палива суттєво впливають напруга і кількість електродів. У перших дослідженнях використовували системи парних електродів: один високої напруги, другий – низької. Електрод низької напруги знаходився в зоні горіння, а електрод високої напруги використовували як подову сітку і виготовляли його з високолегованої сталі з розміром комірки до 2 мм. Напруга на електродах становила 8 кВ. За тривалої обробки низьковольтний електрод, який постійно знаходився в зоні високої температури, інтенсивніше вигорав. Крім того, в ході звичайного горіння будь-якого палива утворюється велика кількість заряджених часток, які за подачі на високовольтний електрод високої напруги сприяють утворенню дугового розряду, що підвищує витрати електроенергії в декілька десятків разів (на спалювання 1 кг вугілля витрачається декілька кВт·год електроенергії). Тобто досягнута економія палива перебивається витратами електроенергії, що зменшує ефект від інтенсифікації процесу горіння. Проведення процесу за таких умов дає економію палива до 7.64 %.

Тому виникла необхідність в дослідженні процесу електронно-каталітичної інтенсифікації горіння вугілля з одним електродом – високовольтним, який був розташований як і в попередніх дослідах. Це попереджувало утворення дугового розряду, і весь процес протікав з бар'єрним розрядом. За тривалого використання цієї системи електрод покрився шаром склоподібного матеріалу, який утворювався зі шлаку вугілля. Цей шар

створював більш сприятливі умови для протікання бар'єрного розряду, що, в свою чергу, стабілізувало інтенсифікацію процесу горіння. Так, за використання цієї системи була досягнута економія палива до 20 %.

Суттєво впливає на процес інтенсифікації горіння твердого палива напруга розряду. Було встановлено, що оптимальна напруга для інтенсифікації горіння – 4 кВ, за якої досягається середня економія палива 20 %. За вищих напругах значення середньої економії палива зменшується, і за 8 кВ становить 8.56 %. Аналогічний ефект спостерігається і за значно нижчих напругах. Так, напруга 2.8 кВ дає середню економію палива до 7.18 %. Була проведена спроба неповної обробки палива. Так була проведена обробка палива перші 2100 с, після чого система вимикалася і процес горіння протікав без обробки. В цьому випадку була досягнута економія палива близько 11 % [21–25].

Витрати електроенергії для всіх перерахованих досліджень становили 25–30 Вт·год на спалювання 1 кг вугілля.

Була також досліджена зміна ступеня вигорання палива. Як видно з табл.1, за різних способах обробки досягалися різні значення підвищення ступеню вигорання палива. В присутності двох електродів і напрузі 8 кВ і одного електроду та тій самій напрузі спостерігалось зменшення ступеню вигорання до відповідно 25 і 16 %. Найбільше підвищення ступеню вигорання палива досягалося за умови обробки з одним електродом і напрузі 4 кВ і становило приблизно 32 %. Інші режими забезпечували значно нижчі ступені підвищення вигорання палива [21–25].

Так само були проведені дослідження газове вугілля і антрацит. Результати впливу електроннокаталізу на процес досліджень представлені в таблиці 2. виділення летких речовин. Досліджували

Table 2

Injecting electronic catalysis into the sight of flying spolks

Таблиця 2

Вплив електронно-каталізу на виділення летких сполук

Вид вугілля	Без обробки, %	Напруга, кВ											
		5		6		7		8		9		10	
		Вміст летких, %	Зміни вмісту, %	Вміст летких, %	Зміни вмісту, %	Вміст летких, %	Зміни вмісту, %	Вміст летких, %	Зміни вмісту, %	Вміст летких, %	Зміни вмісту, %	Вміст летких, %	Зміни вмісту, %
Антрацит	5.87	6.13	4.24	6.27	6.38	6.49	9.55	6.78	13.42	-	-	-	-
Газове вугілля	28.4	32.6	12.88	32.8	13.41	33.4	14.97	36.2	21.54	37	23.2	37.8	24.9

Як видно з таблиці 2, в процесі використання електроннокаталізу спостерігається збільшення виділення летких речовин, що інтенсифікує сам процес горіння і збільшує виділення тепла. На процес виділення летких сполук сильний вплив чинить напруга розряду. Так, зі збільшенням напруги збільшується виділення летких сполук для обох марок вугілля. Для антрациту за напруги 8 кВ досягається збільшення виділення летких сполук до 13.42 % і збільшується зі збільшенням напруги, для газового вугілля – до 24.9 % за напруги 10 кВ, і збільшується за збільшення напруги. Це можна пояснити тим, що в ході звичайного горіння вугілля, згідно з літературними даними [2], в коксовому залишку спостерігається до 15 % летких сполук. А за застосування електроннокаталізу починають виділятися леткі речовини і з цих 15 %, і чим вище напруга, тим інтенсивніше відбувається їх виділення за рахунок руйнування зв'язків як в самих летких сполуках, так і зв'язків між коксовим залишком і леткими сполуками. Цей процес виділення летких речовин може бути використаний для газифікації твердого палива.

Висновки

Вугілля – це самий доступний енергоресурс і його споживання збільшується з кожним роком. Але запаси його не безкінечні. Тому вже зараз стає питання про створення технологій, які б дозволили зменшити витрати вугілля за можливості збільшення кількості енергії, яку отримують в процесі його спалені.

За звичайного горіння вугілля можна виділити наступні стадії: підігрів, випарювання вологи, возгонка летких сполук і коксоутворення, горіння летких сполук, горіння коксу, утворення шлаку.

Використання електронно-каталітичного способу інтенсифікації процесу горіння твердого палива дозволяє підвищити вихід летких сполук з теплотою згорання вищою, ніж теплота згорання сполук, які утворилися за звичайного термолізу. Крім того, використання електроннокаталізу приводить до утворення летких сполук за значно менших температур, що дозволяє використовувати надлишок тепла, який утворився, на цільові потреби.

У процесі електроннокаталізу, крім звичайного процесу горіння вуглецю, відбуваються процеси «трясіння» кристалічної структури коксу, розриву зв'язків між кристалами, що, в свою чергу, покращує процес масообміну кисню і продуктів згорання. Проходження мікророзрядів через цю кристалічну структуру послаблює зв'язки в ній та створює оптимальні умови для процесу горіння коксового залишку, що підвищує ступінь вигорання палива.

На загальний процес горіння вугілля з електроннокаталізом також впливає мікророзряд, електромагнітне поле і потік електронів бар'єрного розряду.

Усе це було підтверджено дослідженнями, які дозволили встановити:

- на процес інтенсифікації горіння твердого палива суттєво впливає напруга розряду. Так, оптимальною є напруга 4 кВ, і досягається середня економія палива 20 %;

- витрати електроенергії для всіх досліджень становили 25–30 Вт·год на спалювання 1 кг вугілля;

- за використання електроннокаталізу спостерігається збільшення виділення летких речовин: для антрациту за напруги 8 кВ – до

13.42 %, для газового вугілля – до 24.9 % за напруги 10 кВ, і ці значення збільшуються зі збільшенням напруги.

References

- [1] World Coal Reserves
<https://www.worldometers.info/coal/>
- [2] Babiy, V.I., Kuvaev, Yu.F. (1986). [Combustion of coal dust and calculation of a pulverized coal torch]. Moscow, Russian Federation: Energoatomizdat (in Russian).
- [3] Khzmalyan, D. M., Kagan, Ya. A. (1976). [Theory of combustion and furnace devices.] Moscow, Russian Federation: Energy (in Russian)
- [4] Warnatz, Y., Maas, W., Dibble, R.: (2003). [Combustion. Physical and chemical aspects, modeling, experiments, formation of pollutants], Moscow, Russian Federation: Fikhmatlit. (in Russian).
- [5] Paraschiv, L. S., Serban, A., Paraschiv, S. (2020). Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal /biomass / solid waste) and analysis of fl ue gas composition. *Energy*, 6, 36–45.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.016>
- [6] Khatri, D., Gopan, A., Yang, Z., Adeosun, A., Axelbaum, R. (2019). Characterizing early stage sub-micron particle formation during pulverized coal combustion in a flat flame burner, *Fuel*, 258(15), 115995.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.016>
- [7] Wang, K., Han, T., Deng, J., Zhang, Y. (2022). Comparison of combustion characteristics and kinetics of Jurassic and Carboniferous-Permian coals in China, *Energy*, 254, B, 124315.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124315>
- [8] Avtaeva, S.V. (2009). [Barrier discharge. research and application]. Bishkek, Kyrgyzstan: Izd-vo KRSU. (in Russian).
- [9] Kogelschatz, U. (2003) Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 23, (1), 1–46
- [10] Sharma, N.K, Misra, S, Varun, V, Pal, U.N. (2020) Experimental and simulation analysis of dielectric barrier discharge based pulsed cold atmospheric pressure plasma jet *Physics of Plasmas* 27, 113502.
<https://doi.org/10.1063/5.0018901>
- [11] Vyazovik, V. M. (2023). [Electron-catalytic intensification of the mountain of gas-like fire]. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(1), 186–194.
<https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i1.271226> (in Ukrainian).
- [12] Uytendhouwen, Y., Bal, K. M., Neyts, E. C., Meynen, V., Cool, P., Bogaerts, A. (2021) On the kinetics and equilibria of plasma-based dry reforming of methane. *Chemical Engineering Journal*. 405(1), 126630
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126630>
- [13] Jia, Z., Yang, N., Sun, L., Zhao, Y., Li W., Luan, J., Lyu, F., Zhang, L.C., Kruzic, J.J., Kai, J.J., Huang, J.C., Lu, J., Liu, C.T., Novel, A. (2020). Multinary Intermetallic as an Active Electrocatalyst for Hydrogen Evolution. *Advanced Materials*, 2000385.
<https://doi.org/10.1002/adma.202000385>
- [14] Chen, J., Jin, Q., Li, Yi., Li, Y., Cui, Y., Wang, C., (2019). Design Superior Alkaline Hydrogen Evolution Electrocatalyst by Engineering Dual Active Sites for Water Dissociation and Hydrogen Desorption *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11(42), 38771–38778
<https://doi.org/10.1021/acsami.9b13657>
- [15] Uytendhouwen, Y., Bal, K. M., Neyts, E. C., Meynen, V., Cool, P., Bogaerts, A. (2021). On the kinetics and equilibria of plasma-based dry reforming of methane. *Chemical Engineering Journal*, 405(1), 126630
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126630>
- [16] Stepanov, E.M., Dyachkov, B.G. (1968) [Ionization in flame and electric field]. Moscow, Russian Federation: Metallurgy. (in Russian)
- [17] He, J., Wen, X., Wu, L., Chen, H. (2022). Dielectric barrier discharge plasma for nanomaterials: Fabrication, modification and analytical applications. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 156.
- [18] Li J., Ma, C., Zhu, S., Yu, F., Dai, B., Yang, D. (2019). A Review of Recent Advances of Dielectric Barrier Discharge Plasma in Catalysis. *Nanomaterials*, 9, 1428.
<https://doi.org/10.3390/nano9101428>
- [19] Gorfinkiel, J.D. (2020). Electron collisions with molecules and molecular clusters. *The European physical journal D*, 7451.
<https://doi.org/10.1140/epjd/e2020-100550-7>
- [20] Bogaerts, A., Zhang, Q. Z., Zhang, Y. R. , Laer, K. V., Wang, W. (2019). Burning questions of plasma catalysis: Answers by modelling. *Catalysis Today*, 337, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.04.077>
- [21] Viazovik, V. (2020). Electrocatalytic intensification of burning processes for hard and gaseous fuel. 3 *International scientific and technical conference «Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources»*, Petrosani, Romania, 33–35.
- [22] Viazovik, V., Stolyarenko, H., Vodanik, O. (2011) The alternative burning of coal. *Nauka i studia, Chemia*. 110–115.
- [23] Stolyarenko, H., Martsinyshyn, U., Viazovik, V. (2008). The alternative burning of hydrocarbon. *Contributed Papes Internetal Workshop «Nonequilibrium Processes In Combustion And Plasma Based Technologies»*, 84–89
- [24] Stolyarenko, G. S., Viazovik, V. N., Vodanik, O. V., Martsinyshyn, U.D, Badko, Y.U. Procede d'intensification de combustion d'un carburant solide. (2008). France Patent № 2 905 001 A1.
- [25] Yarovoi, R.V., Stolyarenko, G.S. (2013). Burning of coal and wood using electrocatalysis/ *Moderrni vymozenosti vedy. Chemie a chemicka technologie*. 65, 67–71.