

Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова
Національна академія наук України

ДАВИДОВ СЕРГІЙ ЛЕОНІДОВИЧ

УДК [622.324: 622.278: 536.12](043.3)

ОБґРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПЕРЕТВОРЕННЯ
ВУГЛЕЦЕВМІСНОГО ГЕТЕРОГЕННОГО СЕРЕДОВИЩА
В ГАЗ ПІД ВПЛИВОМ ЕНЕРГІЇ ПЛАЗМИ

Спеціальність 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнича механіка»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова
Національної академії наук України (м. Дніпро)

Науковий керівник: академік НАН України, доктор технічних наук, професор
Булат Анатолій Федорович
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова
Національної академії наук України,
директор інституту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Інкін Олександр Вікторович
Національний технічний університет «Дніпровська
політехніка» Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри гідрогеології і інженерної геології
кандидат технічних наук, доцент
Скиба Маргарита Іванівна
Український державний хіміко-технологічний університет
Міністерства освіти і науки України,
доцент кафедри технології неорганічних середовищ і
екології

Захист відбудеться «27» вересня 2019 р. о 13³⁰ на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 08.188.01 при Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова
НАН України за адресою: вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпро, 49005, факс
(0562) 46-24-26.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту геотехнічної механіки
ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: вул. Сімферопольська, 2а,
м. Дніпро, 49005.

Автореферат розісланий «23» серпня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор



В.Г. Шевченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні процеси видобутку і збагачення вугілля пов'язані з утворенням великої кількості відходів, які за роки їх накопичення сформували техногенні родовища з різними речовинним складом, фізико-хімічними та механічними властивостями. Такі енергоносії характеризуються низькою теплотворною здатністю, підвищеною вологістю, зольністю та високим вмістом сірки, внаслідок чого не мають попиту на паливному ринку, забруднюють навколишнє середовище і загромождають великі земельні масиви. Утилізація їх прямим спалюванням, як і використання вугілля за цією технологією, є екологічно небезпечним і коштовним заходом. Для їх подальшого використання в якості екологічно безпечного енергоносія, необхідні нові, екологічно чисті технології перетворення гетерогенного середовища.

Відомі автотермічні технології перетворення в газовий стан енергоносіїв такого складу, які базуються на прямому спаленні частини палива, що перетворюється. Проте чисельні недоліки, в першу чергу базових засад, перешкоджають широкому розповсюдженню таких технологій. Їх усунення можливе шляхом використання аллотермічних процесів, де, для підтримки реакцій перетворення, енергія вводиться ззовні від незалежного регульованого джерела. Такою є енергія низькотемпературної плазми, яка, в поєднанні з паровим окиснювачем, найбільш повно відповідає вимогам екології довкілля, комплексному перетворюванню середовища, раціональному його використанню. Проте необхідне в цьому випадку поєднання в часі і просторі основних процесів плазмоутворення, генерування окиснювача із води та перетворення середовища – енергоємні і ускладнюються необхідністю реалізації високотемпературних (2000 – 6000) К режимів. Сумісні процеси плазмохімічних перетворень у високотемпературних потоках, недостатньо вивчені, дотепер не встановлені закономірності зміни стану і властивостей середовища під впливом потоків енергії високої інтенсивності з температурою > 2000 К, відсутні методи обґрунтованого вибору параметрів теплової дії раціональних для отримання газової фази заданої якості, в необхідній кількості.

Тому, обґрунтування раціональних параметрів процесу термічного перетворення вуглецевмісного гетерогенного середовища на основі встановлених закономірностей зміни його стану і властивостей під впливом енергії плазми, подальше вдосконалення способу перетворення в газ корисних і техногенних родовищ є актуальною науковою задачею, для підвищення ефективності процесу перетворення та успішного освоєння таких родовищ і екологічно безпечного їх використання в енергоємних галузях виробництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконана в ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України, відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки до 2020 року «Раціональне природокористування», «Енергетика і ефективність», а також завданням енергетичної стратегії України на період до 2030 року. Автор дисертації є виконавцем держбюджетних тем: «Дослідити та встановити параметри плазмодугових реакторів і процесів газифікації мінеральних

середовищ, що вміщують вуглець, в тому числі відходи вуглезбагачення» (№ ДР 0109U001725); «Науково-технічне обґрунтування параметрів і удосконалення технічних рішень пристроїв паро-плазмової переробки мінеральних вуглецевмісних середовищ, в тому числі відходів вуглевидобутку і вуглезбагачення» (№ ДР 0111U005129); «Наукове обґрунтування параметрів процесів та технічних засобів енергоперетворень вуглецевмісних середовищ газифікацією в електромагнітних полях дугової плазми» (№ ДР 0115U002283).

Ідея роботи полягає у використанні встановлених закономірностей теплової дії енергії плазми і локальних високотемпературних зон інтенсивного теплообміну на процеси зміни стану і властивостей вуглецевмісного гетерогенного середовища для вдосконалення способу перетворення в газ корисних і техногенних родовищ.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є встановлення закономірностей зміни стану і властивостей вуглецевмісного середовища і обґрунтування раціональних параметрів процесу його перетворення в газ, під впливом енергії плазми для подальшого екологічно безпечного використання продуктів вуглевидобутку та інших вуглецевмісних середовищ.

Для досягнення мети вирішувались наступні **задачі**:

1. Визначити основні фактори впливу енергії плазми на процеси перетворення в газ вуглецевмісного гетерогенного середовища, встановити закономірності та обґрунтувати раціональні параметри їх впливу;

2. Визначити характер теплообміну і його залежність від температури в реакційному просторі, встановити закономірності зміни швидкості реакцій перетворення від складових теплового потоку та їх вплив на продуктивність процесу;

3. Розробити алгоритм складання балансу енергії, що вводиться, встановити залежність питомих витрат енергії від температури перетворення, складу окиснювача і середовища;

4. Вдосконалити спосіб термічних перетворень вуглецевмісного середовища і обґрунтувати ефективність його застосування при освоєнні корисних і техногенних родовищ.

Об'єкт дослідження – процеси зміни стану та властивостей гетерогенних вуглецевмісних середовищ під впливом енергії плазми.

Предмет дослідження – закономірності процесу перетворення середовища в газ з урахуванням характеристик енергії, що вводиться, елементного складу середовища та співвідношення мас реагуючих компонентів.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених задач у роботі використано комплексний метод, який включає: аналіз і узагальнення відомих досліджень для обґрунтування доцільності термоперетворення вуглецевмісного середовища в газ під впливом енергії плазми; дослідження процесів термодинаміки перетворень з використанням стандартних програмних пакетів; дослідження процесів кінетики термоперетворення з урахуванням характеру тепло- і масообміну, рівноважного стану та властивостей компонентів, що реагують; експериментальні дослідження процесів з визначенням параметрів дії

енергії плазми; обробку та узагальнення результатів дослідження методами статистичного аналізу.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Вихід газової фази, її склад та енергетичні показники перетворень вуглецевмісного середовища зростають за лінійною залежністю від вмісту вуглецю в середовищі, що перетворюється, складу та питомих витрат окиснювача і досягають максимального значення при температурі повної конверсії вуглецю та ступеню його перетворення рівному 100%;

2. Швидкість реакцій і продуктивність процесу в сумісних процесах термоперетворення і генерації окиснювача з води залежать від температури в реакційній зоні, дисперсності середовища та виду теплообміну і характеризуються гіперболічною залежністю в діапазоні температур (2000 – 3500) K;

3. Раціональне значення температури повної конверсії вуглецю в частинках середовища, що перетворюється, становить 1800 – 2000 K і регулюється часом перебування їх в реакційній зоні, залежного від дисперсності частинок, а ступінь перетворення вуглецю і енергоємність процесу від температури в реакційній зоні зростають, відповідно, за параболічною і лінійною залежністю.

Наукова новизна отриманих результатів:

1 Вперше встановлені залежності, які характеризують вплив температури конверсії вуглецю, температури в реакційному просторі, коефіцієнта витрати окиснювача, елементного складу середовища, що перетворюється, на склад і вихід газової фази, обґрунтовані раціональні параметри дії енергії плазми для одержання максимальних показників виходу газової фази та її теплотворної здатності і доведення ступеню перетворення вуглецю до 99 – 100 %.

2. Вперше встановлені залежності швидкості реакцій перетворення, часу перебування твердих частинок в реакційному просторі (продуктивності процесу в потоці) від температури і дисперсності середовища в сумісних процесах його перетворення і генерації окиснювача.

3. Вперше встановлено раціональне значення температури нагріву дисперсних частинок до повної конверсії вуглецю ($T = 1800 - 2000$ K), коли ступінь його перетворення досягає 100%. Раціональне значення енергоємності процесу, яка зростає лінійно з ростом температури в реакційному просторі, визначається досягненням цієї температури частинками середовища, незалежно від їх дисперсності.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей зміни кількості та складу газової фази при дії енергії парової плазми на вуглецевмісне середовище, в обґрунтуванні раціональних параметрів теплової дії в сумісних процесах перетворення, в розроблених методах визначення питомих енерговитрат процесу перетворення, та оцінки економічної і екологічної доцільності застосування способу, що розробляється в різних галузях виробництва.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено спосіб пароплазмових перетворень вуглецевмісного середовища і пристрої для його практичної реалізації.
2. Розроблено методики розрахунку конструктивних параметрів пристрою для перетворення вуглецевмісного дисперсного середовища в технологіях розробки та освоєння природних та техногенних родовищ.
3. Вдосконалено спосіб отримання захисних атмосфер і пристрій для його реалізації в процесах термічної переробки металу.

Реалізація результатів досліджень.

1. Розроблені «Методика розрахунків енерговитрат перетворень вугілля пароплазмовим способом», «Інженерна методика розрахунків конструктивних і режимних параметрів плазмового реактора» передані ДП «Діпрококс» (акти передачі від 02.04.14р.) і використані при розробці ТЕО для реалізації національного інвестиційного проекту «Виробництво альтернативних видів палива».
2. Спосіб виробництва захисних атмосфер та плазмохімічний реактор для його реалізації використані НВО «Донікс» (м. Запоріжжя). Очікуваний економічний ефект складає 112 грн. на одну тону термооброблюваного металу (акт від 16 04.14 р.).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи підтверджуються: коректністю постановки завдань; використанням фундаментальних положень термодинаміки і стандартних програм моделювання процесів термічних перетворень; використанням відомих положень рівноважної кінетики для розрахунку швидкості хімічних реакцій; адекватністю розроблених методик і достатнім обсягом експериментальних досліджень із використанням стандартних засобів виміру; задовільним збігом результатів теоретичних та експериментальних досліджень процесу термоперетворень з похибкою, що не перевищує 20%; результатами впровадження розроблених «Методик» та «Способа».

Апробація результатів дисертації.

Основні положення дисертації доповідалися на Міжнародній науковій школі ім. акад. С.О. Христиановича «Деформування і руйнування матеріалів з дефектами» (м. Сімферополь, 21-27.09.2009 р., 17-24.09.2010 р., 19-25.09.2012 р., 23-29.09.2013 р.); XXIV науковій конференції країн СНД «Дисперсні системи» (м. Одеса, 4-6.09.2010 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Навколишнє середовище ХХ» (м. Дніпропетровськ, 15-18.11.2010 р.); «Хімія і сучасні технології» (м. Дніпропетровськ, 5-7.05.2011 р., 7-9.05.2017 р.); «Технологія» 26-27.04.2013 р. (м. Северодонецьк); «Форумі гірників - 2016» (м. Дніпро, 12-15.09.2016 р.); «Інноваційні технології» (м. Одеса, 5-8.09.2017 р.); «Поступ в нафтогазопереробній промисловості» (м. Львів, 7-9.06.2018 р.).

Особистий внесок автора. Автором самостійно визначені ідея роботи, мета і задачі досліджень; сформульовані наукові положення; розроблені методики експериментальних досліджень; встановлені закономірності зміни стану і властивостей вуглецевмісного середовища під впливом енергії плазми; виконані розрахунки питомих показників енерговитрат процесу перетворень;

режими і параметри плазмодугового реактора; сформульовані висновки по роботі. Автор безпосередньо приймав участь в моделюванні процесів термоперетворень, при визначенні параметрів кінетики перетворень, в обробці та узагальненні результатів досліджень, в розробці методик і технічних рішень, впроваджених в програми виробництва відновлюваних атмосфер ДП «Діпрококс» (м. Харків) та захисних середовищ відділенням НВО «Донікс» (м. Запоріжжя). Текст дисертації автором викладений самостійно.

Публікації. Основні результати роботи опубліковані у 25 наукових працях, з яких 11 - в фахових виданнях, (з них 2 - входять в міжнародні наукометричні бази, 4 - без співавторів), 9 - в тезах доповідей на конференціях, патентів України - 5.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновку, переліку використаних джерел на 17 сторінках та 6 додатків на 31 сторінці. Загальний обсяг дисертації становить 212, основний текст викладено на 158 сторінках. Текстова частина ілюстрована 51 рисунком й містить 25 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** наведено аналіз стану розвитку технологій і процесів термічних перетворень вуглецевмісних середовищ, зокрема покладів вугілля та техногенних накопичень, достатніх для використання в якості енергоносіїв на 250 - 300 років, і які можуть стати альтернативою нафті та газу. Проте такі енергоносії є складною гетерогенною сировиною і екологічно небезпечною, особливо в технологіях її прямого спалювання. В розділі показано, що суттєвих результатів в розвитку теорії і практики термічних перетворень гетерогенних енергоносіїв в газ досягнуто при розробці автотермічних технологій перетворень: першого покоління – Вінклера, Лургі, Коперс-Тотцека, Тексако; більш досконалі другого покоління – Shell, Prenflo, U-Gas, British Gas/Lurgi, Destec та інші, які є базовими для переходу від технологій прямого спалювання вуглецевмісних гетерогенних середовищ до їх попереднього термоперетворення в газ. Проте побудовані на прямому спалюванні частини перетворюваного середовища автотермічні технології несуть в собі його недоліки: наявність в кінцевому продукті CO_2 (12 - 20%) та сірчаних сполук; надлишкові витрати (до 40%) палива, що перетворюється; необхідність виробництва кисню високої ступені очистки (до 95%); температурні обмеження і, як наслідок, низька швидкість реакційних процесів; високі капіталоємність і цінові показники обладнання для реалізації процесу. Для уникнення цих недоліків необхідний перехід до технологій, де енергія для підтримки ендотермічних реакцій перетворень в потрібній кількості, необхідної якості і в регульованих об'ємах подавалась би від незалежних джерел. Показано, що перспективними є плазмохімічні технології третього покоління, які найбільше підготовлені до використання за глибиною розробки та напрацьованою матеріальною базою. Суттєві результати, при оцінці впливу режимів і параметрів дії енергії плазми на процеси перетворень, отримано колективами Інституту газу НАН України,

Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Казахського енергетичного інституту, Інституту тепло - і масообміну ім. А.В. Ликова НАН Білорусі. Встановлено, що теплова дія енергії плазми відрізняється високими концентрацією енергії та температурою в локальних реакційних зонах, значно прискорює реакційні процеси, позитивно впливає на якісні показники газової фази, можлива комплексна переробка сировини та здійснення процесу термоперетворень в потоці, а також об'єднання в єдиному реакційному просторі і часі процесів плазмоутворення, термоперетворень і генерації окиснювача. Це дає можливість забезпечити високу енергоефективність процесу, відмовитись від складного і дорогого обладнання для виробництва кисню, а також від багатоступеневого перетворення енергії, зменшити металоємність і цінові показники обладнання для перетворень. Проте плазмохімічні технології відрізняються схемами вводу енергії в реакційний простір та умовами теплообміну, надтяжкими умовами роботи обладнання в зонах великих $(2,0 - 6,0) \cdot 10^3$ К температур, високою енергоємністю процесу, особливо в частині підготовки окиснювача із води. Обсяг теоретичних і експериментальних досліджень є недостатнім для визначення закономірностей процесів високотемпературних перетворень і факторів впливу на ці процеси, відсутні відповіді на питання теплообміну в умовах високих температур. Сумісні процеси плазмохімічних перетворень у високотемпературних потоках, недостатньо вивчені, дотепер не встановлені закономірності зміни стану і властивостей середовища під впливом потоків енергії високої інтенсивності з температурою > 2000 К, відсутні методи обґрунтованого вибору параметрів теплової дії раціональних для отримання газової фази заданої якості, в необхідній кількості.

Тому обґрунтування раціональних параметрів процесу термічних перетворень вуглецевмісного гетерогенного середовища на основі встановлених закономірностей зміни його стану і властивостей під впливом енергії плазми і, таким чином, подальше вдосконалення способу перетворення в газ корисних і техногенних родовищ, для підвищення ефективності перетворень та успішного використання таких родовищ в галузях виробництва. На основі проведеного аналізу визначено мету і задачі досліджень.

У **другому розділі** приведені результати дослідження термодинамічних процесів високотемпературних перетворень вуглецевмісних середовищ з використанням універсального пакету програм, які базуються на фундаментальних положеннях термодинаміки, система алгебраїчних рівнянь яких визначає концентрацію елементів газової і конденсованої фаз та їх ентальпію. Дослідження проведені в діапазоні температури $(1 - 4) \cdot 10^3$ К, тиску $0,1 - 0,3$ МПа, питомих витратах окиснювача ($\alpha = 0,1 - 1,9$). Результати досліджень рівноважного стану системи "вода-вугілля", в залежності від температури, приведені на рис 1. Встановлено, що температура є основним фактором, який формує процеси перетворень (рис. 1а), а її значення $1800 - 2000$ К являється раціональним, де спостерігається найбільший вихід газової фази, ступінь переробки вуглецю досягає 100% , калорійність газу максимальна (рис. 1б), як фактор, особливий вплив на вихід та склад газової фази чинить тип

окиснювача (табл. 1). Паровий окиснювач найбільш повно відповідає вимогам якості кінцевого продукту, умовам раціонального використання сировини, що перетворюється та екологічній безпеці. Так, вихід газової фази збільшується на 45 - 46 % порівняно з кисневим окиснювачем і складається на 95 - 99 % з синтез-газу. Її калорійність в 2,5 - 3 рази є більшою порівняно з повітряним окиснювачем. Нейтральні і шкідливі складові не перевищують 1,5 - 2 %, що нижче європейських стандартів. Мінеральна фаза вільна від вуглецю і може бути використана в будівництві.

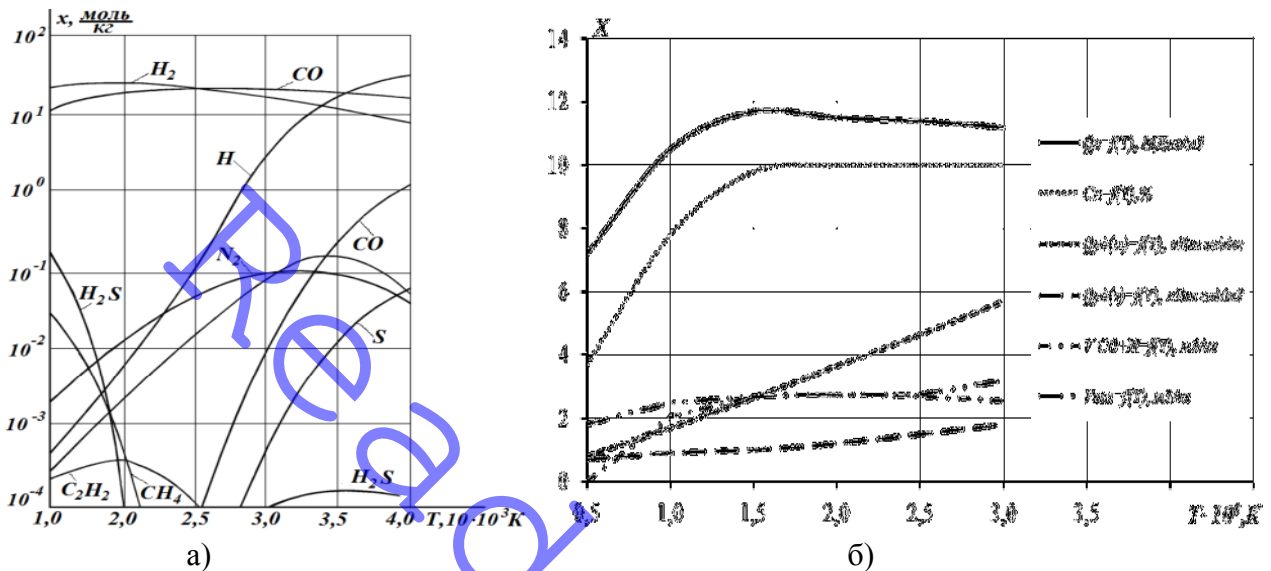


Рисунок 1 – Залежність виходу газової фази (а) та основних показників процесу (б) від температури в реакційному просторі (на прикладі вугілля АШ 1)

Таблиця 1 – Вплив окиснювача на показники перетворення вугілля АШ 1

Окиснювач	Вихід газу, $\frac{\text{нм}^3}{\text{кг вугілля}}$ %								Вміст ($\text{CO} + \text{H}_2$) $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	МДж/м ³ Q_2
	CH_4	CO_2	CO	H_2O	H_2	N_2	N_2C	$\sum V_i$	%	
Повітря	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,01}{0,26}$	$\frac{1,20}{30,93}$	$\frac{0,01}{0,26}$	$\frac{0,25}{6,44}$	$\frac{2,33}{60,05}$	$\frac{0,08}{2,06}$	$\frac{3,88}{100}$	$\frac{1,45}{37,37}$	4,6
	0	0,26	30,93	0,26	6,44	60,05	2,06	100	37,37	
Кисень	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,04}{2,58}$	$\frac{1,24}{80,00}$	$\frac{0,04}{2,58}$	$\frac{0,22}{14,19}$	$\frac{0,01}{0,65}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,55}{100}$	$\frac{1,46}{94,19}$	11,3
	0	2,58	80,00	2,58	14,19	0,65	0	100	94,19	
Водяна пара	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,27}{47,55}$	$\frac{0,001}{0,04}$	$\frac{1,39}{52,04}$	$\frac{0,01}{0,37}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{2,67}{100}$	$\frac{2,66}{99,59}$	11,7
	0	0	47,55	0,04	52,04	0,37	0	100	99,59	

Значний вплив на вихід та склад газової фази чинить третій фактор - відношення мас реагуючих компонентів (питомі витрати окиснювача α). При раціональній температурі для більшості типів вугілля, $\alpha = 0,9 - 0,95$, коли спостерігаються найкращі показники газової фази (рис. 2а), в т.ч. її калорійність (рис. 2б). Розроблено методику розрахунків α з урахуванням елементного складу і вологості вугілля. Показано, що такі розрахунки необхідно проводити окремо для кожного типу палива або при зміні його стану.

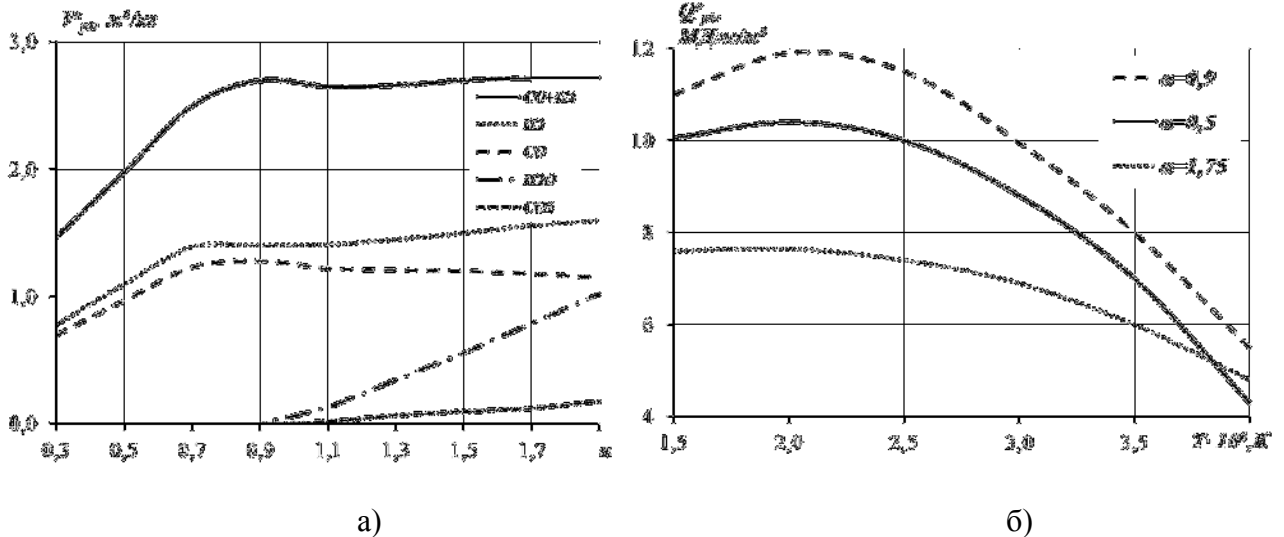


Рисунок 2 – Вплив α на вихід газової фази (а) і залежність калорійності від T при різних α (б)

Для встановлення основних закономірностей і параметрів процесу термоперетворень багатоконпонентних систем, на основі вугілля різного ступеню метаморфізму та шламу, виконані дослідження виходу газової фази в залежності від температури процесу і вмісту вуглецю (рис. 3). Встановлено, що газова фаза на 97 - 99 % складається із CO і H_2 , а її масовий і об'ємний вихід залежить від вмісту C в середовищі, яке перетворюється. Спостерігаються селективність процесу до компонентів газової фази і універсальність його відносно складу перетворюваної сировини. Так, газова фаза на 98 - 99 % представлена висококалорійним синтез-газом. Шкідливі з'єднання в ній CO_2 , NO , NO_2 , SO разом не перевищують 10^{-2} моль/кг, або 1 - 2 % від загальної маси газу. Це значно знижує викиди в навколишнє середовище порівняно з автотермічними технологіями. Встановлено, що повна конверсія вуглецю, в масі вугілля різного ступеню метаморфізму, закінчується при нагріві частинок палива різної дисперсності до температури 1800 - 2000 К.

Знайдені кількісні показники процесу перетворення вуглецевмісного середовища різного складу в діапазоні температури $(1 - 4) \cdot 10^3$ К. Визначено, що раціональні значення температури для повної конверсії вуглецю в дисперсних частинках середовища з різними фізико-хімічними характеристиками складає $(1,8 - 2,0) \cdot 10^3$ К і при паровому окиснювачі вихідний продукт формується селективно складовими монооксиду вуглецю та водню на 97 - 99 %. Ступінь переробки вуглецю досягає 99 %, калорійність - 11,5 - 12 МДж/м³, а вихід газової фази збільшується на 40 - 45 % за рахунок молекулярного водню з окиснювача. Показано, що температура в реакційній зоні, коефіцієнт витрат окиснювача, його тип, своєчасний відбір газової фази з реакційної зони є основними чинниками управління процесами перетворень вуглецевмісного середовища, зміни його стану і властивостей.

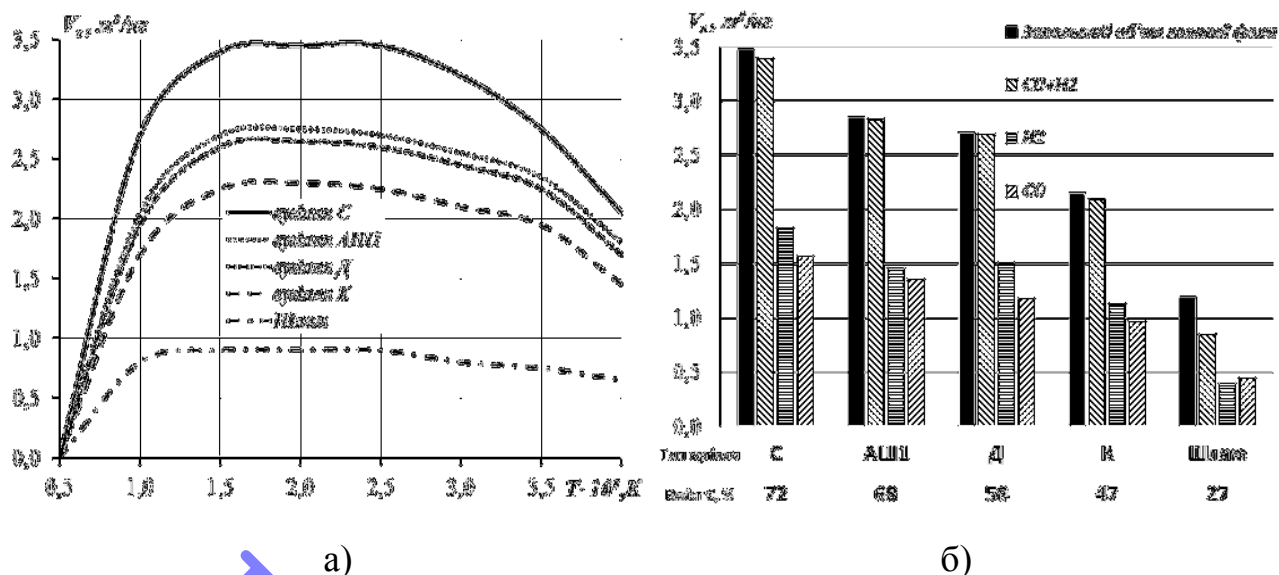


Рисунок 3 – Залежність виходу газу від температури перетворення вугілля різного ступеня метаморфізму та шламу (а); вмісту вуглецю при $T = 1900 K$ (б)

У третьому розділі. Отримані вихідні дані розрахунку продуктивності процесу перетворень, режимів роботи та конструктивних параметрів пристроїв для реалізації способу, що розробляється, створена методика розрахунку швидкості реакцій перетворення дисперсного середовища в залежності від температури, щільності теплового потоку, характеру теплообміну в реакційному просторі і дисперсності середовища, за допомогою якої, встановлюється час нагріву дисперсних частинок реагуючих компонентів до повної конверсії вуглецю. Враховано, що для хімічних реакцій з окиснювачем повітрям, киснем, або водяною парою, при температурах $(2 - 6) \cdot 10^3 K$, енергія активації E_i знаходиться в межах 75 - 120 МДж/кмоль, коли відношення $E_0/RT < 5$ і допустимо застосування рівняння Арреніуса

$$k_i = k_{0i} \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right)$$

де k_{0i} – передекспоненційний множник, м/с; R – універсальна газова постійна, кДж/(кмоль·К); T – температура, К. Досліджувались основні незалежні стадії процесу: нагрів окиснювача і середовища до виходу летких та їх займання при $T = 1073 K$; стійкий процес конверсії вуглецю з коксового залишку ($T=1800 - 1900 K$); своєчасне виведення продуктів термоперетворень.

Дослідження процесу перетворень окиснювача, шляхом визначення часу випаровування води та деструкції її молекул, виконані за рівнянням

$$\tau = \frac{c_0 \rho_0 (r_0^2 - r_1^2)}{2\lambda_1 \ln \left[1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \cdot \frac{c_0}{k} (T_2 - T_0) \right]},$$

де c_0 – теплоємність води, Дж/(кг·К); ρ_0 – її щільність, кг/м³; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); k – теплота випарювання, Дж/кг; T_0, T_2 – температура відповідно води і газу в реакційному просторі, К; r – радіус краплі, м. Індокси: 0 і 1 – параметри в початковий і кінцевий момент часу реакції. Встановлено, що час деструкції молекули води займає не більше 10 % від загального часу перетворень вуглецю, а кисень з води готовий до взаємодії ще до початку стійкого процесу конверсії вуглецю, в т. ч. за реакцією $2C + O_2 = 2CO$. Досліджені дві схеми - розділеного і сумісного вводу енергії в реакційній простір, які відрізняються умовами теплообміну, к.к.д. теплопередачі, стійкістю роботи джерела енергії. Приведена порівняльна оцінка їх кінетичних параметрів.

В розділених схемах вводу енергії, маючи на увазі, що процес відбувається в рівновісній системі переважно в кінетичній області, швидкість (G_c) та час τ_n перетворень вуглецю визначаються залежностями:

$$G_c = \frac{k_{i1} + k_{i2}}{RT_2}, \quad \tau_n = \frac{\rho_c \cdot \delta_c}{2M_c \cdot G_c},$$

де ρ_c – щільність частинки, кг/м³; δ_c – діаметр частинки, м; M_c – молекулярна маса вуглецю, кг/моль.

Визначені константи швидкості основних реакцій $C+O_2=CO_2$; $2C+O_2=2CO$; $C+H_2O=CO+H_2$, енергія активації, коефіцієнт дифузійного обміну газової суміші та взаємної дифузії речовин. Швидкість перетворень вуглецю, час його конверсії, в залежності від розміру частинок, приведено в таблиці 2.

Таблиця 2 - Швидкість реакції і час перетворень частинок середовища в розділених схемах вводу енергії

Температура газу, T_2 , К	Константа швидкості реакції, k_i , м/с		Діаметр частинки коксу, δ_c , мкм				
	$C + O_2 = CO_2$	$2C + O_2 = 2CO$	10	50	100	150	200
	k_1	k_2	Час конверсії, τ , мс				
2000	14,26	11,64	7,54	37,68	75,36	113,03	150,71
3000	234,28	255,18	0,57	2,84	5,69	8,53	11,37
4000	948,84	1189,46	0,17	0,84	1,69	2,53	3,38
5000	2192,24	2994,19	0,09	0,43	0,86	1,28	1,71
6000	3846,65	5538,88	0,06	0,28	0,56	0,84	1,12

Встановлені залежності k_i та G_i зазначених реакцій від температури, слугують вихідними даними для розрахунку часу перетворень дисперсних частинок середовища τ_n . Показано (рис. 4а), що при окисленні парою зі збільшенням температури від $2 \cdot 10^3$ К до $5 \cdot 10^3$ К, τ_n зменшується в 14 - 5 разів відповідно δ_c , в. Динаміка зміни τ_n різна і в діапазоні $(2 - 3) \cdot 10^3$ К - τ_n зменшується в 5 - 3 рази, а в діапазоні $(3 - 5) \cdot 10^3$ К – в 1,5 - 0,5 рази. Це вказує на

більш прийнятний режим перетворення до $3 \cdot 10^3$ К, коли динаміка зміни τ_n максимальна.

В сумісних схемах вводу енергії в реакційній простір константи швидкості реакцій та τ_n визначались за допомогою рівняння теплового балансу

$$\frac{dT_c}{d\tau} = \frac{6Nu\lambda_z}{c_c \cdot \rho_c \cdot \delta_c^2} (T_z - T_c) + \frac{6\sigma_o \varepsilon_c}{c_c \cdot \rho_c \cdot \delta_c} \left[\left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right],$$

де Nu – тепловий критерій Нуссельта; $\sigma_o = 5,76$ – коефіцієнт випромінення абсолютно чорного тіла, Вт/(м²·К⁴); ε_c - ступінь його чорноти.

Час нагріву τ_n від T в реакційному просторі визначається для складових:

конвекційної
$$\ln \frac{T_z - T_{c,o}}{T_z - T_c} = \frac{6Nu\lambda_z}{c_c \cdot \rho_c \cdot d_c^2} \cdot \tau_n;$$

радіаційної
$$\tau_n = \frac{\rho_c \cdot c_c \cdot d_c}{6 \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_c \cdot \varphi} \cdot \frac{1}{4T_p^3} \left\{ \ln \frac{(T_1 + T_p)(T_p - T_0)}{(T_p - T_1)(T_p + T_0)} + 2 \operatorname{arctg} \frac{T_1}{T_p} - 2 \operatorname{arctg} \frac{T_0}{T_p} \right\},$$

де T_p , T_o , T_i – відповідно температура дугового розряду, початкова та задана температури частинки, К.

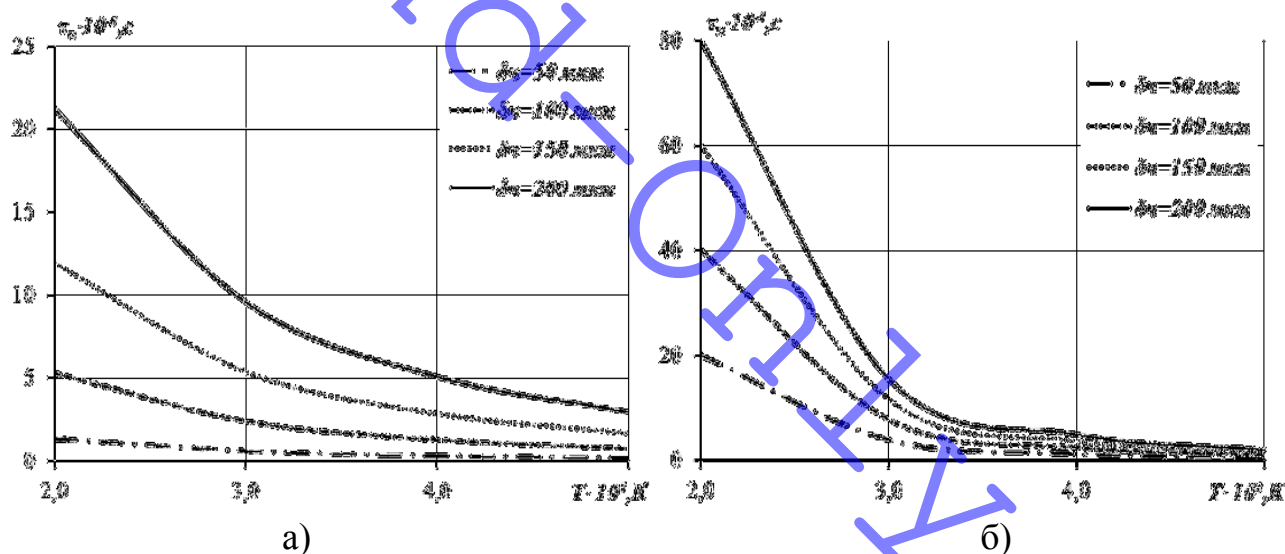


Рисунок 4 – Залежність $\tau_n=f(T)$ в замкнутому реакційному просторі при конвекційному (а) і радіаційному (б) теплообміні

Ці залежності можна описати наступним чином:

- для конвекційного теплообміну:

$$\tau_n \cdot 10^{-3} = 1,4272/T^{1,417}; \delta_c=50 \text{ мкм};$$

$$\tau_n \cdot 10^{-3} = 5,6622/T^{1,402}; \delta_c=100 \text{ мкм};$$

$$\tau_n \cdot 10^{-3} = 12,75/T^{1,405}; \delta_c=150 \text{ мкм};$$

$$\tau_n \cdot 10^{-3} = 22,671/T^{1,404}; \delta_c=200 \text{ мкм};$$

- для радіаційного теплообміну:

$$\tau_n \cdot 10^{-3} = 21,481/T^{2,646}; \delta_c=50 \text{ мкм};$$

$$\tau_n \cdot 10^{-3} = 42,962/T^{2,646}; \delta_c=100 \text{ мкм};$$

$$\tau_n \cdot 10^{-3} = 64,442/T^{2,64}; \delta_c=150 \text{ мкм};$$

$$\tau_n \cdot 10^{-3} = 85,923/T^{2,646}; \delta_c=200 \text{ мкм};$$

Порівняння приведених способів передачі енергії в реакційну зону показує, що при $T \leq 2 \cdot 10^3$ К, більший вплив має конвективна складова, а при $T > 2 \cdot 10^3$ К росте вплив радіаційної складової, яка вже при $T = 5 \cdot 10^3$ К складає 70 % від загального теплового потоку. Характер залежностей $\tau_n = f(T)$ (рис. 4) в обох видах теплообміну однакові і показують, що динаміка росту швидкості нагріву частинки в інтервалі $T = (2 - 3) \cdot 10^3$ К змінюється за гіперболічною залежністю, а при $T > 3000$ К переходить в лінійну з незначним зниженням τ_n и малою залежністю від розміру частинок. Проте в реакторах сумісного типу (рис. 4б), за рахунок радіаційної складової теплообміну, продуктивність процесу буде вищою на порядок від конвективного (табл. 3). На основі установлених термодинамічних і кінетичних залежностей та параметрів термоперетворень розроблено інженерну методику розрахунку параметрів теплової дії конструктивних параметрів реакторів для високотемпературних перетворень дисперсних гетерогенних середовищ.

Таблиця 3 - Розрахунковий час нагріву частини вугілля

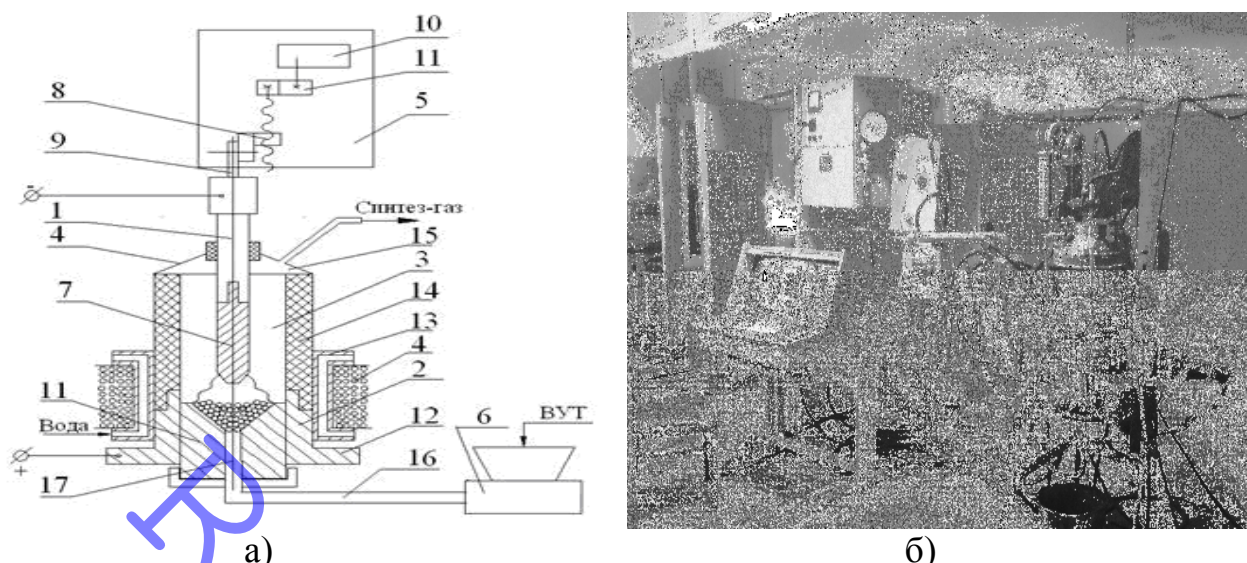
Діаметр частинки, δ_c , мкм	Температура газу, T_g , К			
	2000	3000	4000	5000
	Час нагріву частинки, $\tau_n \cdot 10^3$, с			
50	1,33 / 20,04	0,60 / 3,88	0,32 / 1,22	0,18 / 0,5
100	5,31 / 40,08	2,39 / 7,76	1,27 / 2,44	0,74 / 1,00
150	11,95 / 60,12	5,38 / 11,64	2,85 / 3,66	1,66 / 1,50
200	21,24 / 80,16	9,57 / 15,52	5,08 / 4,88	2,95 / 2,00

Примітка: в чисельнику – конвекційний теплообмін; в знаменнику – радіаційний.

В четвертому розділі приведені результати експериментальних досліджень процесів перетворення водяної суспензії полідисперсного вугілля АШ 1 та шламу, які спрямовані на встановлення характеру і параметрів теплової дії на вуглецевмісне середовище з урахуванням властивості його речовинного складу та типу окиснювача, для встановлення масового і об'ємного виходу газової і конденсованої фаз, ступеню перетворень вуглецю, теплотворної здатності газу.

Дослідження проводились на стенді (рис. 5), що є електродуговим реактором сумісного типу з реакційною камерою 3, по вісі якої, між електродами 7 і 11, горить обертовий дуговий розряд (джерело енергії). Енергія вводиться в реакційній простір дозовано, рівномірно розподіляється по його об'єму. Стехіометричне співвідношення взаємодіючих компонентів розраховано заздалегідь з урахуванням їх фізико-хімічних характеристик, а їх введення забезпечується дозатором 6. Розділення газової і конденсованої фаз виконується в газозбірнику 15, звідки газ, через холодильник, надходить до обліку газовим лічильником та відбирається для аналізу методом газоабсорбційної хроматографії. Дослідження виконувались в діапазоні потужності 20 - 40 кВт, струму дуги – 100 - 280 А, індукції магнітного поля – 0,06 - 0,1 Тл. Параметри і

режими роботи реактора контролювались візуально по приладам на пульті управління і фіксувались в режимі реального часу камерою спостережень.



1 – катодний вузол; 2 – анодний вузол; 3 – реакційна камера; 4 – соленоїд; 5 – механізм запуску та регулювання струму; 6 – дозатор для подачі палива і окиснювача; 7 – катод; 8 – гвинт-гайка; 9 – штанга; 10 – реверсивний двигун; 11 – анод; 12 – водоохолоджуваний анодний утримувач; 13 – обичайка; 14 – ізоляційна футеровка; 15 – газозбірна камера; 16 – колектор; 17 – сопло

Рисунок 5 – Схема стенда (а) та його загальний вигляд (б)

Встановлено, що продуктивність термоперетворень визначається складом реагуючих компонентів середовища, щільністю теплового потоку, хімічними характеристиками вихідної сировини та окиснювача, тепло-масообміном, дисперсністю сировини. Одержані залежності об'ємної продуктивності G^v ($\text{м}^3/\text{год}$), енерговитратності масової ω_{yo}^m ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$) і об'ємної ω_{yo}^v ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$) процесу від щільності теплового потоку q ($\text{Вт}/\text{см}^2$) (рис. 6).

Так, залежності $G=f(q)$ і $\omega=f(q)$ (рис. 6а) носять гіперболічний характер і, чим більше значення q , тим вище темп зростання продуктивності. Рациональне її значення визначається за мінімальним значенням енергоємності процесу або за максимальним виходом газової фази (V_{yo}^v) і ступенем переробки вуглецю (C_n), коли вони досягають значення близького до теоретичного, яке рівне 100%.

Встановлено, що при пароплазмовій газифікації вугілля різної якості відбувається селективний відбір монооксиду вуглецю та водню (синтез-газу). Газ на 86 - 95 % складається з цих компонентів, що співпадає з результатами теоретичних досліджень (98 - 99 %), засвідчуючи високу (до 80 %) їх схожимість. Газова фаза на 44 - 45 % формується воднем з окиснювача, який збільшує її калорійність до 11,5 - 12 $\text{МДж}/\text{м}^3$ і на 40 - 45 % забезпечує рациональне використання сировини, що перетворюється.

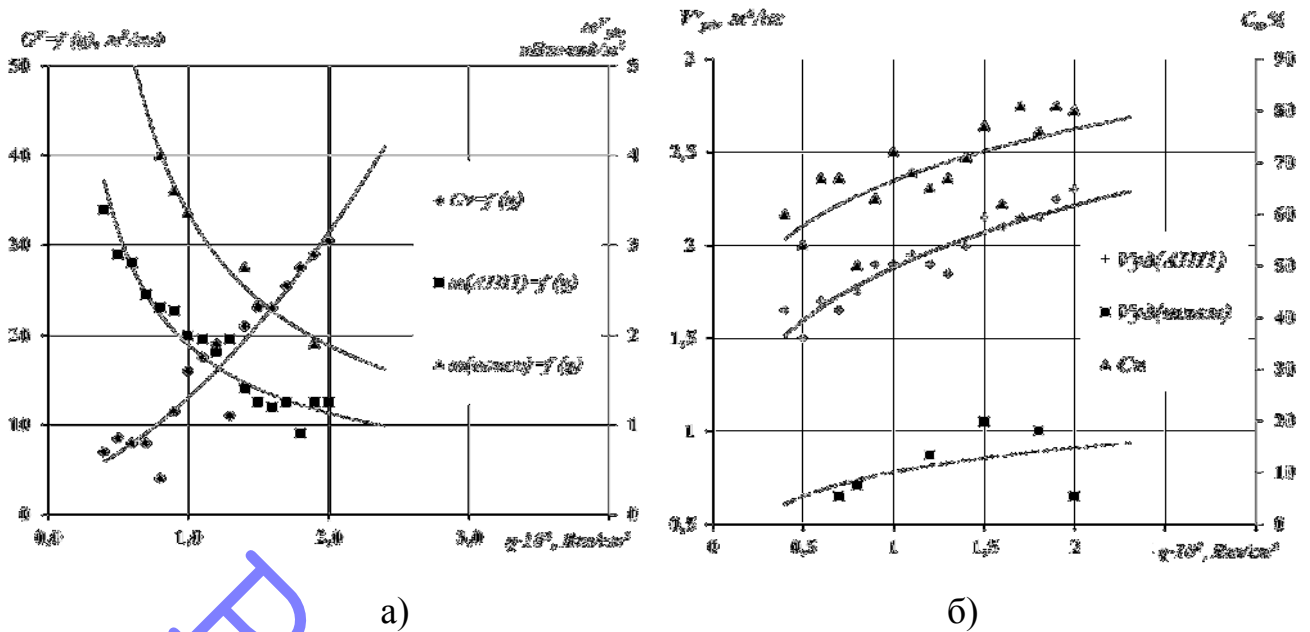


Рисунок 6 – Залежність від щільності потоку енергії: продуктивності $G^v=f(q)$, енерговитратності $\omega_{yd}^v=f(g)$ перетворень вугілля (АШ 1) та шламу (а); питомого виходу газової фази V_{yd}^V для вугілля (АШ 1) і для шламу, ступеню перетворень вуглецю C_n (б).

В розділі приведені розроблені способи термоперетворень та пристрої їх реалізації, які захищені авторським правом. Спосіб та пристрій для його реалізації відрізняються особливістю вводу енергії в реакційний простір через енергетичний конус, занурений в реакційне середовище. Введення енергії таким чином дозволяє рівномірно розподілити її в реакційному просторі, збільшити тепловипромінюючу поверхню джерела енергії, регулювати час перебування частинки палива в реакційному просторі. Конструкція реактора з діафрагмою використана в якості дослідного стенду (рис. 5). Для управління часом перебування частинок палива в реакційній зоні і технологічними показниками процесу розроблені схема двокамерного реактора, спосіб та реактор з зустрічними паливним і енергетичним потоками. Особливість конструктивних схем в тому, що час перетворень частинки регулюється траєкторією її переміщення в реакційному просторі під дією сил динамічного розпилення та гравітаційних сил.

П'ятий розділ присвячено розробці схеми теплового балансу процесу перетворень та методики визначення питомих витрат енергії, що вводиться в реакційний простір для здійснення цих процесів в залежності від складових реагуючих компонентів. Встановлено напрямки зниження енерговитрат процесу, приведена оцінка економічної ефективності застосування пароплазмової технології термоперетворень вугілля, як альтернатива технології його прямого спалювання, а також при виробництві синтетичного моторного палива. Основним методом розрахунку енергії, що вводиться для перетворень одиниці маси сировини, є складання енергетичного балансу, яким визначаються питомі масові ω_{yd}^M та об'ємні ω_{yd}^V енерговитрати процесу.

$$\omega_{y\partial}^M = Q_6 / (3600 \cdot G_y^H \cdot (1 - W/100)), \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг},$$

$$\omega_{y\partial}^V = \omega_{y\partial}^M / V_2, \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3,$$

де Q_6 – енергія, що вводиться в процес термоперетворень для запуску і підтримки ендотермічних реакцій процесу; W – вологість вугілля, %.

При визначенні енергії Q_6 , що вводиться, використано два варіанти її розрахунків. Перший - враховує загальний баланс теплових ефектів всіх реакцій, що відбуваються, і може бути прийнятним тільки при визначеній температурі процесу. При оптимальному її значенні ($T = 1800$ К), коли відбувається повна конверсія вуглецю, енергобаланс визначається залежністю

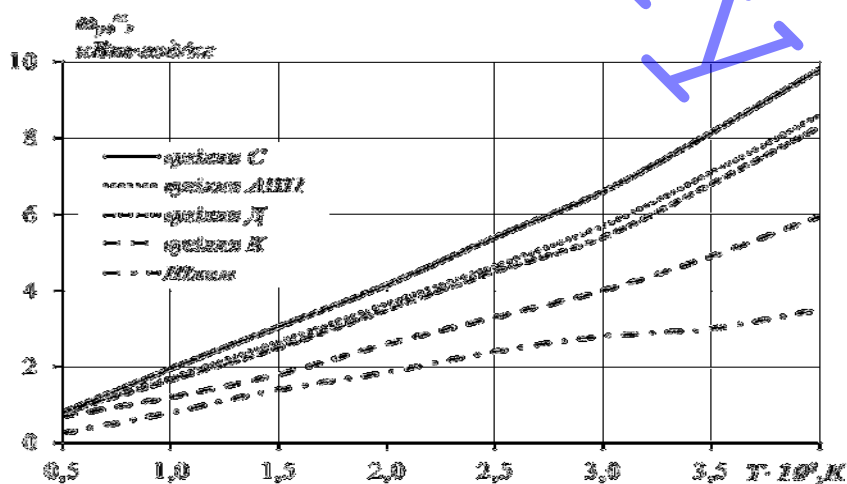
$$Q_y^H + Q_{ок}^H + Q_6 = Q_p + Q_n,$$

Другий - базується на ентальпії кінцевих продуктів перетворень і відрізняється від першого тим, що баланс енергії визначається при різних температурах

$$Q_y^H + Q_{ок}^H + Q_6 = Q_{np}^K + Q_n,$$

де Q_y^H ; $Q_{ок}^H$ – тепло, що вводиться відповідно з вугіллям і окиснювачем; Q_6 – енергія, що вводиться додатково; Q_p – тепло реакцій перетворення; Q_n – витрати енергії реактором, враховуючи його к. к. д.; Q_{np}^K – кількість енергії і-того реагуючого компонента при $T_k = 1800 - 1900$ К. Застосування двох напрямків складання теплового балансу необхідно для визначення достовірності розрахунків Q_6 шляхом порівняння їх значень.

Залежність енергоємності термоперетворень від температури, як масова, так і об'ємна, носить практично лінійний характер (рис. 7) і збільшується, зі збільшенням T незалежно від типу окиснювача. Рациональне її значення може бути визначеним за максимальними виходом газової фази і її калорійності при оптимальному значенні температури $T = (1,8 - 1,9) \cdot 10^3$ К.



Рисунки 7 – Залежність питомих енерговитрат $\omega_{y\partial}^M$ від температури перетворення вугілля різного ступеню метаморфізму

Загальні енергетичні показники процесу перетворень середовища, на прикладі вугілля АШ 1, приведені в таблиці 4. Результати досліджень та розрахунків доводять, що енергія одержаного продукту перетворень, в значній мірі, залежить від типу окиснювача і для парового середовища вона складає 11,47 кВт·год/кг, для повітряного 6,69 кВт·год/кг. Основна частина енергії корисного продукту зосереджена в об'ємі отриманого газу: для пари складає 79,4% від загальної; для повітря не перевищує 38% (таблиця 4). Енергетичний коефіцієнт корисної дії (η), який рівний відношенню одержаної енергії до витраченої в процесі перетворення, для пари і повітря, відповідно складає 0,986 і 0,58, що відповідає різниці більше 40% (таблиця 4). Пояснюється це різницею калорійності одержаного газу, яка в паровому середовищі вища в 2,5 рази, ніж в повітряному за рахунок водня з окиснювача. Розподіляється енергія корисного продукту наступним чином (таблиця 4): 79 - 80 % в енергії отриманого об'єму газу відповідної калорійності; 16 - 18 % - в температурі виходу цих газів; до 1,0 - 1,2 % - в температурі зольного залишку.

Таблиця 4 - Загальний баланс енергії перетворень вугілля АШ 1 під дією енергії плазми та енергетичний коефіцієнт корисної дії процесу

Одиниця вимірювань	Окис. середовище	Енергія перетворень					Енергія продукту				К.к.д η
		Q_y^u	$Q_{ок}^u$	$Q_{y.вн.}^u$	$Q_{в.г.}^u$	$\Sigma Q_{вх}$	$Q_{г.вн.}^k$	$Q_{г.}^k$	$Q_{зола}^k$	$\Sigma Q_{расх}$	
кВт·год	пара	0,005	0,0003	7,97	3,66	11,63	9,24	2,1	0,13	11,47	0,986
%		0,043	0,0026	68,50	31,45	100	79,4	18,05	1,13	98,6	
кВт·год	повітря	0,005	0,256	7,97	3,26	11,49	4,53	2,03	0,13	6,69	0,58
%		0,048	2,202	69,38	28,37	100	37,19	16,67	1,06	54,91	

Показано вплив окиснювача на енергетичні показники термічних перетворень вугілля з різним вмістом вуглецю (таблиця 5). Застосування повітря в 1,5 рази збільшує загальний вихід газової фази і на 20 - 30 % зменшуються енерговитрати. Проте калорійність газу з повітря в 2,5 - 3 рази є нижчою за рахунок зниження в ньому синтез-газу з 97 - 99 % до 35 - 40 % (таблиця 5).

Таблиця 5 – Порівняння показників термоперетворень вугілля та шламу в окиснюючому середовищі різної якості

№ з.п.	Окиснювач	середовище $C, \%$	Показники термоперетворень ($T = 1800 \text{ K}$)						
			$V_{г.ф.}$	V_{CO}	V_{H_2}	$V_{(CO+H_2)}(\%)$	$\omega_{y_0}^u$	$\omega_{y_0}^v$	Q_c
			м ³	м ³ /кг	м ³ /кг	м ³ /кг(%)	кВт·год/кг	кВт·год/м ³	МДж/м ³
1	пара	АШ 1	2,88	1,37	1,48	2,85(99)	3,66	1,27	11,56
		73,54	3,77	1,05	0,19	1,24(33)	3,26	0,86	4,07
2	пара	Шлам	1,14	0,47	0,43	0,9(79)	1,62	1,62	9,31
		27,13	1,11	0,43	0,18	0,6(54)	1,22	1,1	6,63

Від ступеню утилізації тепла газової і конденсованої фаз залежить загальна енерговитратність процесу. Так зниження енергоємності термоперетворень можливо утилізацією тепла продуктів перетворення для огулювання початкової температури окиснювача (води) та вугілля, збільшення якої, наприклад до 700К, може знизити енергоємність процесу на 20 - 25 % (від 3,1 до 2,5 кВт·год/кг) (для АШ 1).

Приведені методики і обґрунтовані економічна ефективність та практична доцільність використання пароплазмової газифікації в порівнянні з прямим спалюванням, визначені зони економічної ефективності застосування пароплазмової технології. Установлена ступінь її залежності від цін на вихідну сировину та енергію, яка вводиться в процесах термоперетворень. Показано, що ефективність технології зростає зі збільшенням ціни твердого палива і глибини утилізації вторинного тепла продуктів газифікації. Порівняно з прямим спалюванням, концентрація викидів в навколишнє середовище може бути доведена до рівня на порядок нижчого європейських стандартів. Технологія виробництва синтетичного моторного палива із вугілля пароплазмовим способом, навіть на рівні діючих цін на енергоносії, конкурентоспроможна серед відомих його виробників (Sasol, Shell та інших).

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна наукова задача, що полягає в обґрунтуванні параметрів процесу термічних перетворень в газ вуглецевмісного гетерогенного середовища на основі встановлених закономірностей зміни його стану і властивостей під впливом енергії плазми і дозволяє вдосконалити спосіб термічного перетворення, підвищенням виходу і якості газової фази, вирішити проблеми екології доквілля, що має суттєве значення при освоєнні і масовому використанні корисних і техногенних родовищ, а також при виробництві відновлювальних та захисних атмосфер в технологіях металургійного комплексу, де очікуваний економічний ефект складає 112 грн. на одну тону продукції.

Основні наукові та практичні результати дисертації полягають у наступному:

1. Встановлено, що запобігти екологічній небезпеці масового використання вугілля та техногенних накопичень за технологіями їх прямого спалювання можливо попереднім перетворенням їх в газовий стан під впливом енергії парової плазми, що найбільше відповідає екологічним вимогам, комплексній переробці та раціональному використанню енергоресурсів. Тому подальше вдосконалення способу термоперетворення вуглецевмісного середовища є одним з варіантів вирішення проблем розробки та освоєння корисних і техногенних родовищ.

2. Дослідженням термодинамічних процесів високотемпературних перетворень вугілля різного ступеню метаморфізму та шламу встановлені закономірності, які характеризують вплив температури в реакційному просторі,

коефіцієнта витрати окиснювача, складу вихідної сировини на склад і вихід газової фази, що дозволили вперше визначити температуру повної конверсії вуглецю 1800 – 2000К, при якій забезпечуються максимальними вихід газової фази, її калорійність, ступінь перетворення вуглецю та екологічна безпека використання зазначених родовищ.

3. Вперше встановлено вплив окиснюючого середовища на якісні, кількісні та енергетичні показники процесу і цільового продукту перетворення. При застосуванні парового окиснювача вихід газової фази на 30-40% є більшим від кисневого, а енергетичний к.к.д. процесу досягає 0,96-0,99, який з повітрям не перевищує 0,6, з киснем – 0,7-0,8.

4. Вперше встановлено, що пароплазмова підготовка вугілля перетворенням його в газ є універсальною до складу і якості середовища, що перетворюється, та селективною до складових корисного продукту, який на 98 - 99 % складається із водню і монооксиду вуглецю, а деструкцією молекулярних з'єднань, при раціональній температурі перетворення $(1,8 - 1,9) \cdot 10^3$ К, вирішуються проблеми забруднення довкілля.

5. Подальшого розвитку набули дослідження кінетики процесів перетворення, вперше встановлені закономірності зміни швидкості реакційних процесів, продуктивності перетворень вуглецевмісного середовища від температури та характеру теплообміну в реакційному просторі.

6. Достовірність отриманих результатів забезпечується достатнім обсягом експериментальних досліджень, виконаних апробованими методами із застосуванням стандартних засобів вимірювань, відносна похибка результатів не перевищує 20%.

7. Вдосконалено спосіб термічних перетворень в газ вуглецевмісних середовищ застосуванням енергії парової плазми, що дозволило в 250 – 300 разів збільшити швидкість реакційних процесів, перевести їх в безперервний поточний режим і відмовитись від дорогого обладнання для виробництва кисню. Встановлено напрямки інтенсифікації процесів термоперетворень, які полягають в регулюванні температури в реакційному просторі, збільшенні поверхні теплового випромінювання і рівномірному його розподілі, своєчасному, при температурі повної конверсії вуглецю, видаленні газової фази із зони термічних перетворень.

8. Результати досліджень процесів газифікації вугілля різного ступеня метаморфізму, методики визначення параметрів процесу перетворення, розрахунки конструкції пристроїв для перетворення використані ДП «Діпрококс» в інвестпроекті «Виробництво альтернативних видів палива» та передані НВО «Донікс» для отримання захисних атмосфер при переробці металу, де очікуваний річний економічний ефект складає 112 грн. на 1 тону переробленої продукції.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В
НАСТУПНИХ РОБОТАХ:

Публікації в наукових фахових виданнях:

1. Булат А.Ф., Алимов Б.Д., Холявченко Л.Т., Давидов С.Л. Комплексная переработка водоугольного топлива при плазменной газификации. Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. пр. ІГТМ НАН України. Дніпропетровськ, 2009. № 81. С. 45 - 54.
2. Давидов С.Л. Пути создания пароплазменных установок для газификации низкосортных углей и отходов углеобогащения. Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. пр. ІГТМ НАН України. Дніпропетровськ, 2009. № 82. С. 167 - 176.
3. Пігіда Є.Ю., Холявченко Л.Т., Демченко С.В., Давидов С.Л. Расчет конструктивных параметров реакционной камеры плазменно-дугового реактора для переработки углеродсодержащих сред. Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. пр. ІГТМ НАН України. Дніпропетровськ, 2012. № 98. С. 193-200.
4. Давидов С.Л. Расчет энергоемкости процесса пароплазменной газификации углеродсодержащих сред. Вопросы химии и химической технологии: Міжвід. зб. наук. пр. ДВУЗ УДХТУ. Дніпропетровськ, 2012. № 1. С. 89-94.
5. Холявченко Л.Т., Давидов С.Л., Осінній В.Я., Наривський Р.Н. Проблемы и перспективы развития экологически чистых технологий переработки низкосортных углей и отходов угольной промышленности. Екологія і природокористування. Збірник наук. праць. Дніпропетровськ, 2012. № 15. С. 144-152.
6. Давидов С.Л. Расчетные показатели переработки углей и отходов их обогащения пароплазменной газификацией. Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. пр. ІГТМ НАН України. Дніпропетровськ, 2013. № 108. С. 179-185.
7. Булат А.Ф., Холявченко Л.Т., Давидов С.Л., Рудика В.І. Структура и взаимосвязь комплексной переработки углеродсодержащих сред методом пароплазменной газификации. Вуглехімічний журнал, 2014. №3. С. 7-14.
8. Kholavchenko L., Oparin S., Davydov S., Maksakova E. Plasma processing of steam coal and mine methane in controlled atmosphere for metallurgical production. Progressive technologies of coal, coalbed methane and ores mining, 2014. Taylor Francis Group, London. P. 87 – 91.
9. Холявченко Л.Т., Пігіда Є.Ю., Давидов С.Л., Демченко С.В. Химическая кинетика процессов переработки дисперсных углеродсодержащих сред в плазме водяного пара. Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. пр. ІГТМ НАН України. Дніпропетровськ, 2016. № 129. С. 181-189.
10. Булат А.Ф., Холявченко Л.Т., Опарін С.О., Давидов С.Л. Оценка экономической и экологической эффективности замещения технологий прямого сжигания твердого топлива пароплазменной газификацией. Доповіді національної академії наук України, 2017. №4. С. 33-41.
11. Давидов С.Л. Особенности физико-химических процессов свободно истекающего двухфазного потока, формируемого высокотемпературной

плазмой. Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. пр. ІГТМ НАН України. Дніпропетровськ, 2014. № 90. С. 49-55

Тези доповідей і матеріали конференцій:

12. Булат, А.Ф., Холявченко Л.Т., Давидов С.Л. Интенсификация плазмо-химических процессов газификации углеродсодержащих дисперсных систем. Дисперсні системи: Мат. XXIV наук. конф. стран СНД. Одеса, 2010. С.58-60.

13. Давидов, С.Л. О комплексной плазмо-химической переработке низкосортных углей и шламов. Довкілля: Мат. XXI міжн. молод. конф. ІГТМ НАН України. Дніпропетровськ, 2010. С. 37-39.

14. Опарін С.О., Давидов С.Л. Расчет удельных энергозатрат процесса плазменной газификации водоугольного топлива. Мат. V міжн. наук.-техн. конф. молодих вчених ДХТУ. Дніпропетровськ, 2011.

15. Холявченко Л.Т., Давидов С.Л., Демченко С.В. Пароплазменная переработка углей с различными физико-химическими характеристиками. Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. Мат. XXII Міжн. наук. школи ім. С.А. Христиановича ТНУ. Алушта, 2012. С. 368-370

16. Опарін, С.О., Давидов С.Л. Модуль пароплазменный для термической переработки углеродсодержащих сред. Технологія-2013. Матеріали наук.-техн. конф. Северодонецьк, 26-27.04.2013. С. 103-105.

17. Холявченко, Л.Т., Опарін С.О., Давидов С.Л. Экономические перспективы производства синтетического моторного топлива из угля пароплазменной газификацией. Матеріали VI наук.-практич. міжн. конф. «Інноваційні технології». Одеса, 2017. С.28-31.

18. Холявченко, Л.Т. Опарін С.О., Давидов С.Л., Ємельяненко В.І. Парова плазма в технологіях термохімічних перетворень вуглецевмісних середовищ. ІХ міжнародна науково-практична конференція «Поступ в нафтогазопереробній промисловості». Львів, 2018. С.277-280.

19. Serhii Demchenko, Yevhen Pihida, Serhii Davydov. Heat exchange processes and productivity of carbon environment transformations of the water-plasma energy stream. E3S Web of Conferences 109, Essays of Mining Science and Practice 2019. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/35/e3sconf_rmget18_00016/e3sconf_rmget18_00016.html

20. Leonid Kholiavchenko, Yevhen Pihida, Serhii Demchenko, Serhii Davydov. Determination of the kinetic constants of the process of plasma gasification of coal-water fuel. E3S Web of Conferences 109, Essays of Mining Science and Practice 2019. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/35/e3sconf_rmget18_00034/e3sconf_rmget18_00034.html

Наукові відкриття і патенти:

21. Патент на корисну модель № 65662 Україна, МПК C10J 3/18, H05B 7/20, H05B 7/22. Пароплазмовий реактор для газифікації середовищ, що містять вуглець / Власник: Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. Васильєв Л.М., Холявченко Л.Т., Давидов С.Л. та інші; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23.

22. Патент на винахід № 97717 Україна. МПК С10J 3/46, С10J 3/48, H05B 7/20, H05H 1/24, B01J 19/08. Спосіб плазмової газифікації водовугільного палива та плазмово-дуговий реактор для його здійснення / Власник: Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. Булат А.Ф., Холявченко Л.Т., Васильєв Л.М., Давидов С.Л.; публ. 12.03.2012, Бюл. № 5.

23. Патент на корисну модель № 81087 Україна. МПК С10J 3/20. Реактор плазмово-дугової газифікації водовугільного палива / Власник: Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. Булат А.Ф., Васильєв Л.М., Холявченко Л.Т., Давидов С.Л.; публ. 25.06.2013, Бюл. № 12.

24. Патент на корисну модель №103678 Україна. МПК В82 3/00. Пристрій для синтезу вуглецевих наноматеріалів плазмодуговим методом / Власник: Національна металургічна академія України. Старовойт А.Г., Кеуш Л.Г., Давидов С.Л., Антончик В.Є.; публ. 25.12. 2015, Бюл. № 24.

25. Патент на корисну модель № 131770 від 11.01.2019. Електродуговий пароплазмовий реактор для перетворення середовищ, які містять вуглець / Заявник: Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. Холявченко Л.Т., Давидов С.Л., Емельяненко В.І., Антончик В.Є.; публ. 25.01. 2019, Бюл. № 2.

Особистий внесок здобувача у роботах, написаних в співавторстві:
 [1,8,10] – проведення експериментальних робіт, аналіз та обробка результатів лабораторних досліджень, формування висновків; [3] – встановлення залежності об'єму отриманого газу від температури в процесі теплової дії; [9] – проведення розрахунків моделі процесу теплової дії, аналіз отриманих результатів; [6,7] – обробка результатів експериментальних досліджень; [15,17,19,20] – формулювання мети роботи, проведення теоретичних розрахунків, аналіз отриманих результатів; [10,13] – розробка методики та розрахунок енергетичних витрат процесу теплової дії; [14,18] – проведення лабораторних досліджень; [21-25] – проведення патентних досліджень, формування відзнак і формули винаходу, обґрунтування новизни винаходу.

АНОТАЦІЯ

Давидов С.Л. Обґрунтування параметрів процесу перетворення вуглецевмісного гетерогенного середовища в газ під впливом енергії плазми. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнична механіка». – Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, м. Дніпро, 2019 р.

В роботі встановлені закономірності зміни стану і властивостей вуглецевмісного гетерогенного середовища в газ під впливом енергії плазми, визначені основні фактори цього впливу, обґрунтовано раціональні параметри процесу перетворення. В умовах сумісних в часі і просторі процесів плазмоутворення, генерації окиснювача з води і перетворення середовища, встановлені залежності виходу і складу газової фази, її енергетичних показників, ступеню перетворення вуглецю від температури в реакційному просторі, якості

та складу середовища і окиснювача, співвідношення мас реагуючих компонентів. Встановлено раціональне значення температури повної конверсії вуглецю в частинках дисперсного середовища, коли спостерігаються максимальними ступінь перетворення вуглецю та вихід газу з вмістом енергетичної складової 99% за рахунок водня з окиснювача. Визначені залежності кінетичних констант швидкості реакцій перетворення та продуктивності процесу від температури в реакційному просторі, характеру теплообміну, конвективної і радіаційної складових теплового потоку. Розраховані енергетичні показники процесу перетворення з урахуванням елементного складу середовища і окиснювача та енергетичний коефіцієнт корисної дії процесу, встановлено рівень вирішення проблем екологічної безпеки. Дана оцінка застосування пароплазмового способу в загальній теплоенергетиці, при виробництві синтетичного моторного палива, в технологіях прямого відновлення заліза, визначена економічна ефективність застосування способу при виробництві захисних атмосфер для термічної обробки металу, очікуваний економічний ефект складає 112 грн. на 1 тону переробленої продукції.

Ключові слова: вуглецевмісне середовище, техногенні накопичення, парова плазма, енергія, теплова дія, термоперетворення, газова фаза.

АННОТАЦІЯ

Давыдов С.Л. Обоснование параметров процесса превращения углеродсодержащей гетерогенной среды в газ под воздействием энергии плазмы. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.09 - «Геотехническая и горная механика» Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова НАН Украины, Днепр, 2019

В работе установлены закономерности изменения состояния и свойств углеродсодержащей гетерогенной среды в газ под воздействием энергии плазмы, определены основные факторы этого влияния, обоснованы рациональные параметры процесса преобразования. В условиях совмещенных во времени и пространстве процессов плазмообразования, генерации окислителя из воды и превращения среды, установлены зависимости выхода и состава газовой фазы, ее энергетических показателей, степени превращения углерода от температуры в реакционной пространстве, качества и состава среды и окислителя, соотношения масс реагирующих компонентов. Установлено рациональное значение температуры полной конверсии углерода в частицах дисперсной среды, когда наблюдаются максимальные степень превращения углерода и выход газа с содержанием энергетической составляющей 99% за счет водорода из окислителя. Определены зависимости кинетических констант скорости реакций превращения и производительности процесса от температуры в реакционной пространстве, характера теплообмена, конвективной и радиационной составляющих теплового потока. Рассчитаны энергетические показатели процесса преобразования с учетом элементного состава среды и окислителя и энергетический коэффициент полезного действия процесса, установлен уровень

решения проблем экологической безопасности. Дана оценка применения пароплазменного способа в общей теплоэнергетике, при производстве синтетического моторного топлива, в технологиях прямого восстановления железа, определена экономическая эффективность применения способа при производстве защитных атмосфер для термической обработки металла, ожидаемый экономический эффект составляет 112 грн. на 1 тонну переработанной продукции.

Ключевые слова: углеродсодержащая среда, техногенные накопления, паровая плазма, энергия, тепловое воздействие, термопревращение, газовая фаза.

ABSTRACT

Davydov S.L. Substantiation of process parameters of carbon-containing heterogeneous medium conversion into gas under the influence of plasma energy. - Manuscript.

The thesis intended for getting a degree of technical sciences candidate. Specialty: 05.15.09. – “Geotechnical and Mining Mechanics”, Institute of Geotechnical Mechanics named by M.S. Polyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2019.

The thesis establishes the regularities of state and properties change of a carbon-containing heterogeneous medium while converting into gas under the influence of plasma energy, determines the main factors of this influence, substantiates the rational parameters of the conversion process. The dependences of the output and composition of the gas phase, its energy indicators, the carbon conversion degree on the temperature in the reaction space, the quality and composition of the environment and the oxidant, and the ratio of reacting species masses in the contexts of plasma formation processes coordinated in space and time, generation of oxidant from water and the conversion of the environment are determined. The rational temperature value of complete carbon conversion in particles of a dispersed medium has been established when the maximum degree of conversion of carbon and the output of gas with the content of 99% energy component due to hydrogen from the oxidizer is observed. The dependences of kinetic constants of the conversion speed reactions and process productivity on the temperature in the reaction space, the nature of heat exchange, convective and radiation components of the heat flow are determined. The energy indicators of the conversion process considering the elemental composition of the medium and the oxidizer, and the energy efficiency factor of the process are calculated, the level of solving environmental safety problems is set. The application of the steam-plasma method in the general heat power engineering during the production of synthetic motor fuel in the technologies of direct reduction of iron has been estimated; the economic efficiency of the method used in the production of protective atmospheres for thermal treatment of the metal has been determined, the expected economic effect amounts to 112 UAH per ton of processed products.

Keywords: carbon-enriched medium, man-made accumulation, steam plasma, energy, thermal effect, thermal transformation, gas phase.

Давидов Сергій Леонідович

Обґрунтування параметрів процесу перетворення вуглецевмісного гетерогенного середовища в газ під впливом енергії плазми

(Автореферат)

Підписано до друку __.__.____.Формат 60×90/16

Гарнітура Times. Друк різнографічний.

Папір офсетний. 1,08 умов. друк. арк.

Тираж 100 прим. Зам. № _____

Друк ТОВ «Барвікс»

Свідоцтво про внесення до державного реєстру

№24 від 25.07.2000 р.

49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 17