

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними та економічними процесами

Інтелектуальні системи енергопостачання

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: Дослідження процесу енергоперетворення вуглецевмісної сировини в електродуговому реакторі
за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті

зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав: студент групи: ЕЕ2221

/ Валентин ІСКОВ /

Керівник:

/ доцент Олександр ЖЕВЖИК /

Нормоконтролер:

/ доцент Ірина ПОТАПЧУК /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

Дніпро – 2024 Рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Energy and economic processes management

Intellectual power supply systems

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: Study of the process of energy conversion of carbon-containing raw materials in an electric arc reactor

according to educational curriculum Energy and electromechanical systems in transport

in the Speciality: 141 Power engineering, electrical engineering and electromechanics

Done by the student of the group: / Valentyn Iskov /

Scientific Supervisor: / Ass. Prof. Oleksandr Zhevzyk /


Normative controller : / Ass. Prof. Iryna Potapchuk /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними процесами
Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
Освітня програма: Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті
Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСЕ

 Дмитро БОСІЙ

Дата

12.01.2024

на кваліфікаційну роботу ЗАВДАННЯ
магістр з електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки

студенту Іскову Валентину Олександровичу

1. Тема роботи: “Дослідження процесу енергоперетворення вуглецевмісної сировини в електродуговому реакторі”

Керівник роботи: Жевжик Олександр Владиславович, к.т.н., доцент

затверджені наказом від

"18" січня 2023 р.

№ 56 ст

2. Строк подання студентом роботи: 08.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Хімічний склад вуглецевмісної сировини, її теплофізичні властивості, дисперсність, початкова температура, теплофізичні властивості плазмоутворюючого газу та його температура, потужність плазмотрону.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Вступ

4.2 Узагальнення досліджень процесів енергоперетворення...

4.3 Математичне моделювання енергоперетворення вуглецевмісної сировини в електродуговому реакторі

4.4 Результати розрахунків

4.5 Висновки та рекомендації

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Схема електродугового реактора. 2. Рівняння математичної моделі. 3. Рівняння термохімічних реакцій, крайові умови. 4. Результати розрахунків.

5. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи:

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Завдання видав: | Завдання прийняв: |
|--------|---|-----------------|-------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1 | Вступ | 2 жовтня 2023 р | |
| 2 | Узагальнення досліджень процесів енергоперетворення дисперсного вуглецевмісного середовища під дією енергії плазми | 23 жовтня 2023 р | |
| 3 | Математичне моделювання енергоперетворення вуглецевмісної сировини в електродуговому реакторі | 6 листопада 2023 | |
| 4 | Результати розрахунків | 1 січня 2024 | |
| 5 | Висновки та рекомендації | 8 січня 2024 | |
| 6 | Подання кваліфікаційної роботи до кафедри | 8 січня 2024 | |
| 7 | Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії | 16 січня 2024 | |

Студент

Валентин ІСКОВ

Керівник роботи

Олександр ЖЕВЖИК

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 61 с., 8 рис., 4 табл., 8 джерел.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються при енергоперетворенні вуглецевмісної сировини в електродуговому реакторі.

Мета роботи – теоретичне дослідження процесів на основі розробленої математичної моделі з розв'язком системи рівнянь моделі чисельним методом.

Методи дослідження – аналітичні та чисельні методи.

Одержані результати – зроблено оцінку способів і технічних засобів інтенсифікації тепло- і масопереносу в процесах плазмохімічних перетворень вуглецевмісних середовищ і виявлено вплив теплообміну на нагрів частинки вуглецевмісної сировини (вугілля) в реакційній камері при температурі газового середовища до 2000 К.

Розроблено методику математичного моделювання процесу перетворення дисперсної вуглецевмісної сировини в потоці енергії водяної плазми і дугового розряду. Визначено вплив параметрів потоку енергії дугового розряду на нагрів вугільної частинки в реакційному просторі.


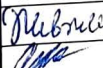


Наведено розрахунок основних геометричних, теплових і режимних параметрів пароплазмового модуля потужністю 160 кВт.

Ключові слова: ВУГЛЕЦЕВМІСНА СИРОВИНА, ВУГІЛЛЯ, ПЛАЗМОВИЙ РЕАКТОР, ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА, ЕНЕРГОПЕРТВОРЕННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

ЗМІСТ

| | | |
|--|--|----|
| Вступ | | 8 |
| 1 Узагальнення досліджень процесів енергоперетворення дисперсного вуглецевмісного середовища під дією енергії плазми..... | | 11 |
| 1.1 Способи і технічні засоби інтенсифікації теплообміну процесів перетворень гетерогенного середовища при дії енергії плазми..... | | 11 |
| 1.2 Методика математичного моделювання процесів перетворення дисперсного вуглецевмісного середовища в потоці енергії водяної плазми та дугового розряду..... | | 17 |
| 1.3 Розрахунок та порівняння кінетичних параметрів термоперетворень вуглецю під дією енергії потоку плазми та дугового розряду..... | | 24 |
| 2 Математичне моделювання енергоперетворення вуглецевмісної сировини в електродуговому реакторі..... | | 28 |
| 2.1 Визначення сил взаємодії електро- та газодинамічних складових енергії дугового розряду в реакційному просторі сумісних процесів..... | | 28 |
| 2.2 Методика розрахунку часу перетворень вуглецевмісної дисперсної частинки під дією газодинамічної складової енергії парової плазми..... | | 32 |
| 2.3 Математичне моделювання газодинаміки, теплообміну та енергоперетворення двофазного потоку вуглецевмісної сировини..... | | 36 |

02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ

| Зм. | Арк | № документа | Підпис | Дата | | Літера | Аркуш | Аркушіє |
|-----------|-----|---------------|---|----------|--|---------------------------------|-------|---------|
| Розробник | | Ісков В.О. |  | 12.01.24 | <u>Дослідження процесу енергоперетворення вуглецевмісної сировини в електродуговому реакторі</u> | М | 6 | 61 |
| Консульт | | | | | | МОНУ, УДУНТ, ІСЕ, гр. EE2221 | | |
| Керівник | | Жевжик О.В., |  | 12.01.24 | | | | |
| Н.контр | | Потанчук І.Ю. |  | 12.01.24 | | | | |
| Зав.каф | | Босий Д.О. |  | 12.01.24 | | | | |

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 61 с., 8 рис., 4 табл., 4 джерел.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються при енергоперетворенні вуглецевмісної сировини в електродуговому реакторі.

Мета роботи – теоретичне дослідження процесів на основі розробленої математичної моделі з розв'язком системи рівнянь моделі чисельним методом.

Методи дослідження – аналітичні та чисельні методи.

Одержані результати – зроблено оцінку способів і технічних засобів інтенсифікації тепло- і масопереносу в процесах плазмохімічних перетворень вуглецевмісних середовищ і виявлено вплив теплообміну на нагрів частинки вуглецевмісної сировини (вугілля) в реакційній камері при температурі газового середовища до 2000 К.

Розроблено методичку математичного моделювання процесу перетворення дисперсної вуглецевмісної сировини в потоці енергії водяної плазми і дугового розряду. Визначено вплив параметрів потоку енергії дугового розряду на нагрів вугільної частинки в реакційному просторі.

Наведено розрахунок основних геометричних, теплових і режимних параметрів пароплазмового модуля потужністю 160 кВт.

Ключові слова: ВУГЛЕЦЕВМІСНА СИРОВИНА, ВУГІЛЛЯ, ПЛАЗМОВИЙ РЕАКТОР, ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА, ЕНЕРГОПЕРТВОРЕННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3.1 | Рівняння збереження маси нерозривності, кількості руху, енергії та хімічних реакцій перетворення в загальному вигляді..... | 36 |
| 2.3.2 | Рівняння нерозривності, кількості руху, енергії для одномірного потоку..... | 40 |
| 2.3.3 | Рівняння руху та теплообміну з частинкою..... | 52 |
| 3 | Результати розрахунків..... | 55 |
| | Висновки та рекомендації..... | 60 |
| | Перелік посилань..... | 61 |

ВСТУП

Проблемою економік світової спільноти є зростаючий негативний вплив на навколишнє середовище шкідливих викидів в технологіях прямого спалювання всіх видів природного палива, особливо твердого, яке розглядається найбільш близькою альтернативою природним вуглеводнів – нафті і газу. Оскільки ці найбільш «чисті» енергоресурси стають все менш доступними, а тверде паливо екологічно «брудне», повинні бути синтезовані нові, екологічно чисті енергії і палива. Природно, основні вимоги до такого палива – воно повинно відповідати сучасним екологічним вимогам, бути доступним за економічними і технічними показниками, конкурентним на ринку енергоресурсів. І немає сумнівів в тому, що роботи по створенню технології, яка дозволяє вирішити одночасно всі ці проблеми є дуже актуальними.

Вирішити її можливо шляхом використання аллотермічних технологій, де для запуску і підтримки енергетичних реакцій термоперетворення, енергія вводиться ззовні від незалежного джерела. Особливе місце серед таких технологій займає плазмохімічна технологія (ПХТ), де досяжні густини енергії в реакційному просторі $10^3 \dots 10^4$ Вт/см², температура $(2,0 \dots 6,0) \cdot 10^3$ К. У цих умовах найбільш повно проявляються каталітичні ефекти термоперетворень, а деструкції схильні молекулярні сполуки всіх реагуючих компонентів. Така технологія відрізняється: універсальністю до морфології сировини, що переробляється: раціональним (на 40...50 %) його використанням за рахунок H_2 з окиснювача; селективністю кінцевого продукту, обмеженого виходом H_2 і CO на 96...99 %; зростаючими в сотні разів в полях високих температур швидкістю хімічних реакцій і продуктивністю процесу в потоці; екологічною безпекою як самого процесу, так і продукту перетворень; малою металоємністю і капіталоємністю основного обладнання.

Дослідженнями, виконаними в Україні, показана можливість отримання газу з заданими фізико-хімічними властивостями шляхом регулювання співвідношення основних реагуючих компонентів – вугілля-вода. Отримано газ

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 8 |

з підвищеним вмістом водню. У порівнянні з традиційними способами переробки запропонований спосіб дозволяє здійснити екологічно чистий процес без викидів в навколишнє середовище шкідливих речовин.

Слід зазначити, що технологія гетерогенних плазмохімічних процесів (тобто система плазма-дисперсні матеріали) в даний час розроблена ще недостатньо і вимагає подальшого узагальнення та аналізу результатів, отриманих в процесі досліджень і технологічних розробок. У зв'язку з тим, що плазмохімічний метод переробки вуглецевмісних середовищ має порівняно високу енергоємність процесу, подальші дослідження спрямовані на пошук способів поліпшення його економічних показників.

Мета роботи – теоретичне дослідження процесів на основі розробленої математичної моделі з розв'язком системи рівнянь моделі чисельним методом.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямкам роботи кафедри «Інтелектуальні системи енергопостачання» Українського державного університету науки і технології.

Мета роботи. Побудувати математичну модель процесів енергоперетворення вуглецевмісної сировини (вугілля), та провести дослідження на основі розв'язку рівнянь моделі чисельним методом.

Відповідно до поставленої цілі в роботі вирішені наступні завдання:

складання замкненої системи рівнянь математичної моделі та розв'язання її за допомогою чисельного методу;

складання програми для ПЕОМ для розв'язку рівнянь математичної моделі, проведення розрахунків з аналізом отриманих результатів.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються при енергоперетворенні вуглецевмісної сировини в електродуговому реакторі.

Методи дослідження – аналітичні та чисельні методи.

Практичне значення отриманих результатів: результати роботи можливо використовувати при проектуванні нових та дослідженні існуючих електродугових реакторів для енергоперетворення вуглецевмісної сировини.

| | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 9 |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | |

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на XII Міжнародна науково-практична конференція «EUROPEAN SCIENTIFIC CONGRESS» (25-27.12.2023) SPC "Sci-conf.com.ua", Мадрид, Іспанія. 2023.

Публікації.

Ісков В.А., Потапчук І.Ю., Жевжик О.В. Математичне моделювання енергоперетворення вуглецевмісної речовини в електродуговому ректорі / В.А. Ісков, І.Ю. Потапчук, О.В. Жевжик // Proceedings of XII International Scientific and Practical Conference “European scientific congress” (December 25-27, 2023). Barca Academy Publishing. Madrid, Spain. 2023. Pp.157-160.

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 10 |

1 УЗАГАЛЬНЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЕННЯ ДИСПЕРСНОГО ВУГЛЕЦЕВМІСНОГО СЕРЕДОВИЩА ПІД ДІЄЮ ЕНЕРГІЇ ПЛАЗМИ

1.1 Способи і технічні засоби інтенсифікації теплообміну процесів перетворень гетерогенного середовища при дії енергії плазми

Плазмохімічні процеси в даний час широко відомі в самих різних областях науки і техніки. Вони дозволяють значно інтенсифікувати окремі процеси хімічної, металургійної, машинобудівної та інших галузей промисловості, синтезувати речовини, які іншими методами отримати неможливо. Плазмохімічна обробка вихідної сировини дозволяє отримувати продукти з особливими фізико-хімічними властивостями.

До особливостей технології плазмової газифікації слід віднести те, що даний спосіб може бути використаний не тільки для переробки вугілля різного ступеня метаморфізму, водовугільних палив шляхом їх газифікації, а також для переробки широкого класу мінеральних вуглецевмісних середовищ (в тому числі відходів вуглезбагачення, шламів, відходів системи водоочищення, сланців і інших видів).

Високі концентрації CO і H_2 (синтез-газу), які генеруються в продуктах плазмової газифікації, дозволяють використовувати їх в якості вихідної сировини для виробництва метанолу, моторного палива та інших рідких енергетичних видів хімічних сполук, а також застосовувати їх в якості робочих середовищ в технологіях отримання тепла і електроенергії або прямого відновлення заліза з руди.

Раніше в Україні виконані дослідження при лазерному і плазмовому впливі на вугілля з різним ступенем метаморфізму [1]. Встановлено вплив швидкості нагріву (10^3 K/c) і температури на коефіцієнти реакційного газообміну, швидкості деформації кристалічної решітки матеріалу, енергії активації міжфазових перетворень.

| | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | 11 |

Аналіз отриманих залежностей показав існування зламів, пов'язаних з протіканням у вугіллі конкуруючих активаційних процесів. Одним з таких енергоємних процесів є дифузія атомів вуглецю, обумовлена великим градієнтом температур. При дії на вугілля різної ступені метаморфізму концентрованим потоком енергії інтенсивно протікають процеси виходу вуглецю на поверхню вугільного речовини.

У таблиці 1.1 представлені енергії активації міжфазових перетворень вугілля марки «А» під дією концентрованих потоків енергії з густиною потужності $10^3 \dots 10^5$ Вт/см².

Таблиця 1.1 – Значення енергії активації

| Вид процесів | E, кДж/моль | | |
|----------------------|-------------|---------------|---------------|
| | 1600 К | 1600...2500 К | 2500...3500 К |
| Реакційний газообмін | 70 | 23 | 16 |
| Деформація структури | 16,2 | 81,85 | 429,75 |
| Дифузія | 100 | 412 | 430 |

Порівняння величин енергій активації термічних процесів, що протікають в вугіллі марки «А», показало, що при нагріванні вугілля до 1600 К найменш енергоємним є процес реакційного газообміну вуглецю з газами, що супроводжується формуванням кристалічної решітки в вугіллі. У зв'язку з тим, що за час досягнення температури 1600 К кристалічна структура вуглецю в вугіллі не встигала повністю сформуватися, визначальним процесом слід вважати процес реакційного газообміну.

У діапазоні температур 1600...2500 К протікали конкуруючі процеси – реакційного газообміну: деформації кристалічної структури і дифузії. З огляду на той факт, що в цьому діапазоні температур швидкість процесу дифузії була ще незначною, а кількість активних атомів вуглецю було витрачено, визначальним процесом слід вважати деформацію кристалічної структури вугілля. При температурах більше 2500 К енергія активації деформації

кристалічної структури дорівнювала енергії активації протікання процесу самодифузії і відповідала енергії розриву зв'язків C-C.

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень було встановлено, що при високих температурах впливу на вугілля процес газифікації повинен здійснюватися при температурах 1600... 2000 K, що забезпечує протікання найменш енергоємного процесу реакційного газообміну з енергією активації 70 кДж/моль. У діапазоні температур 2500...3500 K переважаючим є процес деформації кристалічної структури (розрив зв'язків C-C), що супроводжується збільшенням енергії активації до 429 кДж/моль.

Подальшими напрямками підвищення швидкості термічних перетворень є збільшення енерговнеску по коливальним рівням газифікуючого реагенту, а також підвищення температури поверхні вуглецю шляхом збільшення коливальних температур газифікуючих реагентів і створення в газовій фазі межі невривнозваженості. Це дозволить найбільш економічно вкладати в протікання процесів хеміадсорбції і десорбції атомів вуглецю енергію, одержувану при горінні через ряд послідовних елементарних актів [2]: збільшення ступені іонізації газофазних реагентів; прискорення електронів; створення умов електронного удару молекул і передача енергії електронів коливального збудження молекулам через автоіонізаційний стан; взаємодію збудженої (коливального рівня) молекули з поверхнею конденсованої фази; поверхневу дисоціацію вуглецю з утворенням комплексу CO.

Даний комплекс заходів, що інтенсифікують процес газифікації, зумовлює вибір характеру термічного впливу на вугільні частинки, джерела високотемпературного впливу, а також методу економічного введення зовнішньої енергії в зону протікання хімічних реакцій [2-4].

Для збільшення швидкості реакцій та газифікації необхідно збільшити середньомасову температуру нагрівання частинок вугілля, яка визначається молекулярною, електронною та променевою теплопровідністю [3].

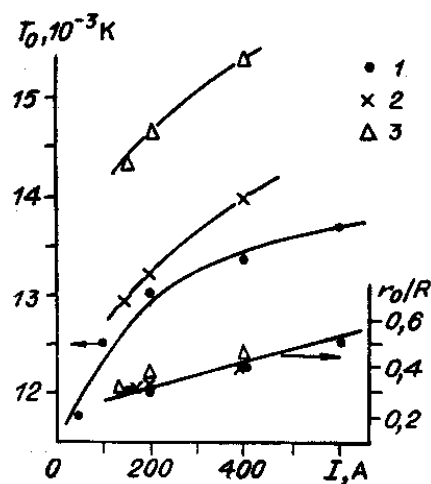
При молекулярній теплопровідності основними переносниками теплової енергії в плазмі є молекули газу, а коефіцієнт молекулярної теплопровідності

| | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | 13 |

слабо залежить від температури. При електронній теплопровідності в плазмі електрони є основними переносниками теплоти. У цьому випадку коефіцієнт електронної теплопровідності залежить від температури сталим чином. У разі переважання променевої електропровідності, коефіцієнт променистої теплопровідності сильно залежить від температури.

Збільшення енерговкладу в перетворення частинок вугілля через температуру нагріву можна здійснити двома способами – шляхом збільшення променевої електропровідності плазми за рахунок вибору складу високоенергетичного плазмоутворюючого газу і шляхом збільшення струму дуги.

Взаємозв'язок температури плазми і струму дуги наведено на рис. 1.1 [3].



$$1 - d = 2 \cdot 10^{-2}; 2 - 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; 3 - 10^{-2} \text{ м.}$$

Рисунок 1.1 – Залежність температури стовпа дуги від струму і діаметру каналу

З рис. 1.1 видно зміна температури на осі плазмового дугового стовпа і залежність радіуса дугового стовпа r_0 від струму і діаметра каналу. При збільшенні струму дуги для великих діаметрів каналу помітна деформація радіального профілю температури, а саме – зменшення величини r_0 з ростом витрат газу - спостерігається тільки при токах I менше 150 А. У будь-якому

випадку (при токах більше 200 А) залежність величини температури плазмоутворюючого газу від струму є нелінійною. Крім того, математичне моделювання процесу газифікації показує, що в результаті збільшення струму дуги збільшується промениста електропровідність плазми, що в свою чергу пов'язано зі збільшенням коливальних температур молекул CO , CO_2 і C_2 [2], енергетичний стан яких і є інтенсифікуючим фактором газифікації.

До найважливіших чинників, інтенсифікуючих процеси високотемпературних перетворень вуглецевмісних середовищ, слід віднести своєчасність і швидкість відведення газоподібних продуктів. Відведення газового продукту повинно проводитися відразу після повної конверсії вуглецю при температурі 1800...2000 К.

Процеси плазмової газифікації необхідно здійснювати в плазмохімічних реакторах, які в залежності від способу введення вугілля в реакційну зону поділяються на реактори роздільного і сумісного типу [3], тобто газифікація вугілля здійснюється як в струмені плазмоутворюючого газу (реактори розділеного типу), так і безпосередньо у відкритому розряді електродуги (реактори сумісного типу).

При використанні плазмохімічного реактора сумісного типу нагрівання пиловугільного палива відбувається безпосередньо в електричному розряді, де частинки вугілля зазнають інтенсивного нагріву за рахунок передачі їм енергії в результаті теплопровідності, конвекції і випромінювання, що значно збільшує продуктивність і ККД процесу в порівнянні з продуктивністю і ККД реакторів роздільного типу [2].

У плазмохімічних реакторах сумісного типу магнітне поле впливає на гідродинаміку заряджених елементарних частинок плазми, електронів, іонів. Останні в свою чергу захоплюють в рух недисоційовані атоми і молекули газу. Так, магнітне поле, сформоване соленоїдом певної конфігурації, перетворює протяжну плазмову струміль в розширену - дифузну з хорошим перемішуванням. Ділянка стовпа дуги переміщується під дією сили Ампера в зоні полюсів електромагнітів, де перетинаються вектори магнітних і

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 15 |

електричних полів, а іони і електрони плазми за зоною електричного розряду продовжують рухатися за напрямками, які визначаються магнітними полями, що розходяться [2]. Використання магнітних полів для розширення плазмової зони сприяє створенню плазмо-технологічних апаратів з об'ємним розрядом, що відбувається в схрещених електричному і магнітному полях [2].

Як відомо [3], відкриті електричні дуги мають більш високі температури в ядрі плазмового каналу і відповідно високі густини потужності радіаційного випромінювання, що дозволяє значно інтенсифікувати процес теплообміну з вугільними частинками.

Одним із шляхів інтенсифікації та управління параметрами процесу газифікації є використання електричних і магнітних полів шляхом впливу їх на реакційну зону в плазмохімічних реакторах. Управління формою плазмового потоку і його гідродинамікою може бути здійснено при накладенні магнітного поля на плазмовий потік, а також зону електричного розряду.

Для інтенсифікації процесу газифікації в реакторах суміщеного типу доцільно використовувати потужнострумний електричний розряд, що горить в схрещених електричному і магнітному полях. Обертаючись плазмова дуга утворює порожнистий конус, всередину якого вводиться середовище та обробляється. Особливо ефективний процес плазмової газифікації при використанні водовугільного палива (ВВП) з безпосереднім горінням дуги в водовугільній суспензії. Охолодження стовпа дугового розряду водовугільною суспензією повинно приводити до збільшення напруженості електричного поля (при постійній величині струму) і електричної потужності дуги, тобто до часткового заповнення енергії плазми і підвищення ККД. пристрою. Високі густина теплового потоку і температура відкритого потужнострумного електродугового розряду (сила струму більше 150 А), що досягають відповідно значень $10^2 \dots 10^3$ Вт/см² (в зоні опорних плям дуги) і 4000...7000 К по осі стовпа сприяють скороченню часу перетворень вугілля. Управління плазмохімічним процесом газифікації в даному випадку може здійснюватися струмом дуги,

| | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 16 |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | |

залежить перебіг подальших стадій – вихід летких, перетворення коксового залишку.

Оскільки низькосортне вугілля і відходи вуглезбагачення мають значну зольність (40...60 %), то процес утворення синтез-газу з органічної частини вугілля і компонентів з мінеральної частини найбільш повно наближений до реальних умов при використанні методу термодинамічного моделювання високотемпературних процесів.

Розглянемо вплив параметрів плазмодугового потоку на нагрівання вугільної частинки. При електродуговому нагріванні вугільна частинка отримує теплоту від електричної дуги і надалі від плазмоутворюючого газу. Прогрівання частинок твердого палива в камері реактора відбувається за рахунок радіаційного та конвективного теплообмінів між частинкою і потоком гарячих газів.

Рівняння теплового балансу для частинки, що рухається в потоці газу, в припущенні, що відсутні градієнт температури по перетину частинки для ендотермічних реакцій перетворення органічної маси твердого палива, мають вигляд [1]

$$m_c c_c \cdot \frac{dT_c}{d\tau} = \alpha_k (T_g - T_c) F_n + \sigma_0 \varepsilon_c \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] F_n, \quad (1.1)$$

де m_c - маса частинки, кг;

c_c - питома теплоємність частинки; Дж/(кг·К);

α_k - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

T_g і T_c - температура відповідно газу і частинки, К;

F_n - площа поверхні, м²;

ε_c - ступінь чорноти частинки;

$\sigma_0 = 5,76$ - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м²·К⁴);

τ - час, с.

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 18 |

Після перетворення рівняння (1.1) з урахуванням значень $m_q = \frac{\pi d_q^3}{6} \rho$, $F_{нов} = \pi d_q^2$ та $\alpha_k = Nu \lambda_2 / \delta_q$ отримаємо диференціальне рівняння прогрівання частинки

$$\frac{dT_q}{d\tau} = \frac{6Nu\lambda_2}{c_q \cdot \rho_q \cdot d_q^2} (T_2 - T_q) + \frac{6c_o \varepsilon_q}{c_q \cdot \rho_q \cdot d_q} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_q}{100} \right)^4 \right], \quad (1.2)$$

де λ_2 - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

Nu – число Нуссельта.

У рівнянні (1.2) перша складова правої частини характеризує конвективну, а друга – променисту (радіаційну) складову сумарного теплового потоку.

Розв'язок диференціального рівняння (1.2) можливий тільки чисельними методами.

Інтегрування рівняння (1.2) при урахування тільки конвективної складової дає такий вираз поточної температури частинки:

$$T_q = T_2 - (T_2 - T_{q,0}) \exp\left(-\frac{6Nu\lambda_2}{c_q \cdot \rho_q \cdot d_q^2} \cdot \tau\right), \quad (1.3)$$

де $T_{q,0}$ - початкова температура частинки, К.

Для зручності обчислення параметра τ рівняння (1.3) можна написати у вигляді:

$$\frac{T_2 - T_{q,0}}{T_2 - T_q} = e^{\left(-\frac{6Nu\lambda_2\tau}{c_q \cdot \rho_q \cdot d_q^2}\right)} \text{ або } \ln \frac{T_2 - T_{q,0}}{T_2 - T_q} = \frac{6Nu\lambda_2}{c_q \cdot \rho_q \cdot d_q^2} \cdot \tau. \quad (1.4)$$

де $e=2,71$ – основа натурального логарифма.

Так як в складі продуктів газифікації при високих температурах ($T_f > 2000$ К) дуже мало випромінюючих газів CO_2 і H_2O , то вони вносять несуттєвий внесок в загальний процес теплообміну в реакційній камері. Основний склад

| | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 19 |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | |

продуктів газифікації при високих температурах складають одно- і двоатомні гази, які не беруть участі в радіаційному теплообміні. Променистий теплообмін в реакційній камері здійснюється між електричною дугою і частинками вугілля.

Особливість розроблення плазмодугового способу газифікації полягає в тому, що водовугільне паливо подається безпосередньо в зону дуги, тобто в зону дуже високих температур (4000...7000 К), де здійснюється його нагрівання з великою швидкістю. Миттєвий вихід водяної пари з обмеженого об'єму краплини (з 1 грама води виділяється близько 980...1000 см³ водяної пари) буде послаблювати вплив конвективного теплообміну на процес нагрівання частинок вугілля. При цьому буде зростати роль радіаційного теплообміну.

Час нагрівання вугільної частинки від T_0 до $T_1 < T_p$ за рахунок радіаційного теплообміну визначається за формулою [1]

$$\tau_n = \frac{\rho_c \cdot c_c \cdot d_c}{6 \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_c \cdot \varphi} \cdot \frac{1}{4T_p^3} \left\{ \ln \frac{(T_1 + T_p)(T_p - T_0)}{(T_p - T_1)(T_p + T_0)} + 2 \operatorname{arctg} \frac{T_1}{T_p} - 2 \operatorname{arctg} \frac{T_0}{T_p} \right\}, \quad (1.5)$$

де T_p - радіаційна температура навколишнього простору (в нашому випадку температура стовпа дугового розряду), К;

T_0, T_1 - відповідно початкова температура вугільної частинки і задана температура нагріву частинки, К;

φ - кутовий коефіцієнт опромінення частинки;

Очевидно, що термодинамічне моделювання процесу нагрівання полідисперсних частинок вугілля при сукупному впливі конвективного і променистого теплообміну є досить важким завданням. Воно вирішувалось за допомогою застосування методу послідовних наближень. Сутність його полягає в наступному. При заданій температурі процесу газифікації T_2 і теплофізичних показниках вугільної частинки і довільно обраному значенні τ_n за рівнянням (1.4) визначається конвективна складова температури нагріву частинки $T_{чк}$.

| | | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.ЕЕ2221.КРМ.2024-ПЗ | | | | | 20 |

Потім по рівнянню $T_{cp} = T_l = 1800 - T_{чк}$ визначається радіаційна складова температури нагріву. При отриманому значенні T_l розв'язується рівняння (1.5) і визначається τ_n при променистому теплообміні між газом і часткою вугілля. Кінцеве значення τ_n приймається за умови, коли отримане значення τ_n за рівнянням (1.5) збігається з τ_n за рівнянням (1.4). В іншому випадку розрахунок повторюється до виконання умови.

Запропонована методика визначення τ_n застосовна при дослідженні процесу газифікації в реакторі розділеного типу, в якому здійснюється конвективний і радіаційний теплообмін між високотемпературним газом і вугільною частинкою.

У реакторі сумісного типу має місце складний теплообмін. Він представляє собою сукупність одночасно протікаючих теплопровідності, конвективного переносу тепла і теплового випромінювання. Конвективне перенесення теплоти здійснюється між газом (водяною парою) і твердої часткою, а променисте (радіаційне) – між електричною дугою і водяною парою, а також між газом і часткою. Спочатку частина питомого теплового потоку, проходячи через шар водяної пари, поглинається їм і нагріває його до певної температури. Інша частина теплового потоку дуги проходить далі і впливає на тверді частинки і поверхню реакційної камери.

Максимальне значення теплового потоку від електричної дуги частинка отримує при проведенні процесу газифікації з температурою $T_{г} > 3500$ К. У цих умовах оточуючий частку газ є прозорим для теплових променів, так як в ньому дуже мало трьохатомних газів.

Таким чином, радіаційна складова сумарного теплового потоку, що потрапляє на частинку складається з двох частин – теплового потоку від електричної дуги і теплового потоку від газу.

На основі вищевикладеного математичне моделювання процесу перетворення дисперсного вуглецевмісного середовища в камері реактора сумісного типу може бути представлена наступним чином.

При малих швидкостях руху газу в камері реактора можна приймати число $Nu=2$, тоді конвективний тепловий потік визначається співвідношенням

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 21 |

$$q_k = \alpha_k (T_z - T_u) = 2\lambda_z (T_z - T_u) / d_u, \quad (1.6)$$

де α_k - коефіцієнт тепловіддачі від газу до частинки, Вт/(м²·К).

Радіаційний тепловий потік від газу до частинки q_{pz} визначається за рівнянням

$$q_{pz} = \varepsilon_z \cdot \varepsilon_u \cdot C_0 \left(\frac{T_z}{100} \right)^4, \quad (1.7)$$

де ε_z , ε_u - ступінь чорноти відповідно газу і частинки.

У нашому випадку, коли в якості окиснювача використовується водяна пара $\varepsilon_z = \varepsilon_{H_2O}$. Для визначення випромінювальної здатності водяної пари рекомендується емпірична залежність [3]

$$\varepsilon_{H_2O} = 0,71 (P_{H_2O} \cdot l)^{0,6} \cdot P_z^{0,2} \left(\frac{T_z}{100} \right)^{-1}, \quad (1.8)$$

де P_{H_2O} - парціальний тиск водяної пари, Па;

P_z - тиск газу в камері реактора, Па;

l - довжина шляху промені, м.

Для обчислення випромінювання водяної пари рекомендується відома в теплоенергетиці формула [3]

$$q_{H_2O} = 3,5 P_{H_2O}^{0,8} \cdot l^{0,6} \left(\frac{T_z}{100} \right)^3 \quad (1.9)$$

Парціальний тиск водяної пари в суміші газів залежить від його об'ємної частки при різних температурах. Він визначається за рівнянням $P_{H_2O} = x_{H_2O} \cdot P_z$,

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 22 |

можна знехтувати і для променистого теплового потоку з достатньою точністю використовувати (1.7).

Таким чином, наведена методика дозволяє визначати час повного перетворення вуглецевмісного середовища в реакційній камері при спільному впливі променистого і конвективного теплообмінів і управляти їх параметрами з метою інтенсифікації процесу газифікації.

1.3 Розрахунок та порівняння кінетичних параметрів термоперетворень вуглецю під дією енергії потоку плазми та дугового розряду

Одним з можливих методів переробки з введенням тепла в реакційну зону від зовнішнього джерела є газифікація пилоподібного палива або водовугільного палива водяною парою, нагрітим до високих температур ($T \geq 2000$ K) в плазмотроні або плазмодуговому реакторі [1,3].

У реакторі сумісного типу частинки вугілля зазнають інтенсивного нагріву за рахунок передачі дуговим розрядом енергії в результаті теплопровідності, конвекції і випромінювання, що значно збільшує продуктивність і ККД процесу в порівнянні з реакторами розділеного типу. Важливим електродинамічним параметром дугового розряду є потужність, яка визначається силою струму і напругою. Зі збільшенням струму відбувається зростання абсолютного значення температури стовпа дуги. Для інтенсифікації процесу газифікації доцільний потужнострумий дуговий розряд, палаючий в схрещених електричному і магнітному полях. Плазмова дуга, що обертається, утворює порожнистий конус, всередину якого вводиться середовище, що обробляється. Високі густина теплового потоку і температура потужнострумий дугового розряду ($I > 150$ A), що досягають відповідно значень $10^2 \dots 10^3$ Вт/см² і 4000...7000 K по осі стовпа, сприяють скороченню часу конверсії частинок вугілля.

В основі управління процесом газифікації лежать закономірності кінетики протікаючих реакцій і масообмінних процесів. Для визначення основних

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 24 |

характеристик процесу газифікації твердих палив використовуються методи математичного моделювання окремих стадій процесу і їх умови переходу однієї стадії в іншу. Одним з основних процесів, що впливають на наступні стадії термоперетворень, є процес нагрівання частинок вугілля, від ефективності якого залежить перебіг подальших стадій – вихід летких, перетворення коксового залишку.

Розглянемо вплив параметрів плазмодугового потоку на нагрів вугільної частинки в реакційній камері при спільному впливі двох видів теплообміну. Прогрів частинок в камері реактора сумісного типу відбувається за рахунок конвективного і променистого теплообмінів між частинкою і потоком гарячих газів, а також випромінюванням дуги. Раніше встановлено, що повна конверсія вугільної частинки з твердого в газоподібний стан здійснюється при її нагріві до температури $T_c = 1800$ К. Необхідно визначити дуже важливий параметр хімічної кінетики – час повної конверсії вугільних частинок, який покладено в основу визначення ефективності процесу переробки палива. Отримане значення часу конверсії дозволяє провести порівняльну оцінку процесу газифікації в реакторах розділеного і сумісного типів.

В загальному вигляді строгий теоретичний розрахунок часу нагріву частинок вугілля до повної конверсії вуглецю представляє надзвичайно складне завдання. Хімічні та фізичні перетворення частинок вугілля в період їх розігріву, нестационарність процесів, вигорання летких – все це поки не піддається теоретичному розрахунку. Однак для вугілля типу «антрацит» завдання дещо спрощується і з низкою припущень її можна сформулювати. Так, якщо взяти теплоємність частинки постійною, знехтувати зміною маси і термоперетворенням летких, то при малих значеннях числа Біо ($Bi < 1$) рівняння теплового балансу для частинки, що рухається в потоці газу, має вигляд (1.1).

Отримані рівняння (1.4) і (1.5) цікаві в тому відношенні, що дозволяють оцінити роль окремих факторів при різних способах розігріву частинки. Так, при прогріванні частинки за рахунок конвекції від газового середовища час розігріву має бути пропорційним квадрату розміру частинки і є функцією

| | | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 25 |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | | |

температури газу в першому ступені. При радіаційному розігріві повинна бути лінійна залежність від розміру частинок і кубічний від температури навколишнього середовища. Рішення рівнянь (1.4) і (1.5) здійснювалося методом послідовних наближень.

Як вже раніше зазначалося, нагрів частинки вугілля в реакційній камері відбувається за рахунок тепла газів, які набувають температури від 2000 до 6000 К при різних витратах палива і постійної потужності електричної дуги. При цьому температура газів пропорційна силі струму дуги. У цьому діапазоні температури коефіцієнт теплопровідності газів змінюється від 0,213 до 0,599 Вт/(м·К), а питома теплоємність – від 2,480 до 3,289 кДж/(кг·К). Температура частинки вугілля в процесі газифікації змінюється від $T_0 = 300$ К до моменту переходу її в газоподібний стан $T_{\text{ч}} = 1800$ К. Розрахунок конвективної і радіаційної складових сумарної температури частинки проводився для розмірів $d = 50 \dots 200$ мкм. Для цього розміру частинок можна приймати $Nu = 2$. Коефіцієнт чорноти частинки $\epsilon_{\text{ч}} = 0,85$. Густина і теплоємність вугілля визначені по залежності роботи [4] і мають таке значення: $\rho_{\text{ч}} = 1600$ кг/м³; $c_{\text{ч}} = 1410$ Дж/(кг·К).

У таблиці 1.2 наведені результати розрахунків часу нагріву частинки вугілля марки АШ 1 при температурі газу ($T_p \approx T_g$) в камері реактора $T_g = 2000 \dots 5000$ К. Тут же дано значення конвективної і радіаційної складових сумарної температури нагріву частинок вугілля.

Аналіз результатів досліджень дозволяє встановити залежність темпу конверсії вуглецю від величини температурного поля, в якому протікають хімічні реакції при газифікації. Критерієм оцінки служить час нагрівання частинки до граничної температури. Встановлено, що для частинок розміром $d_{\text{ч}} = 50$ мкм при зміні температури газу від 2000 до 5000 К процес конверсії завершується швидше в 11 разів. Максимальне прискорення процесу конверсії вуглецю має місце в діапазоні зміни температури газу в реакційній камері від 2000 до 3000 К, а час конверсії вуглецю змінюється від $2,32 \cdot 10^{-3}$ до $0,85 \cdot 10^{-3}$ с. При $T_g > 3000$ К темп прискорення процесу газифікації сповільнюється.

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 26 |

При низьких температурах частинки важливу роль може грати конвективний теплообмін. При подальшому розігріві в результаті виділення парів води і летких зростає роль радіаційної складової в підводі теплоти, а вплив конвективного теплообміну слабшає. З аналізу таблиці видно, що при зміні температури газу в реакційній камері від 2000 до 5000 К конвективна складова температури частинки зменшується в 1,2 рази, а радіаційна складова зростає в 1,6 рази. Прошарок, що утворюється у поверхні частинки шляхом виділення газів і парів, послаблює конвективний теплообмін, але менш перешкоджає радіаційному теплообміну між часткою і навколишнім середовищем.

Таблиця 1.2 – Значення часу конверсії частки вугілля АШ

| Температура газу, T_g , К | Температура частинки, К | | Час конверсії, 10^3 , с |
|-----------------------------|-------------------------|------------|---------------------------|
| | конвективна | радіаційна | |
| $d_p = 50$ мкм | | | |
| 2000 | 1404 | 396 | 2,32 |
| 3000 | 1318 | 482 | 0,85 |
| 4000 | 1237 | 563 | 0,39 |
| 5000 | 1163 | 637 | 0,21 |
| $d_p = 100$ мкм | | | |
| 2000 | 1327 | 473 | 8,2 |
| 3000 | 1197 | 603 | 2,9 |
| 4000 | 1080 | 720 | 1,3 |
| 5000 | 980 | 820 | 0,65 |
| $d_p = 150$ мкм | | | |
| 2000 | 1257 | 543 | 16,5 |
| 3000 | 1044 | 756 | 5,2 |
| 4000 | 952 | 848 | 2,4 |
| 5000 | 867 | 933 | 1,2 |
| $d_p = 200$ мкм | | | |
| 2000 | 1207 | 593 | 27,0 |
| 3000 | 1028 | 772 | 9,0 |
| 4000 | 873 | 927 | 3,7 |
| 5000 | 785 | 1015 | 1,8 |

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЕННЯ ВУГЛЕЦЕВМІСНОЇ СИРОВИНИ В ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ РЕАКТОРІ

2.1 Визначення сил взаємодії електро- та газодинамічних складових енергії дугового розряду в реакційному просторі сумісних процесів

Для інтенсифікації процесу газифікації в реакторах, де сумісні процеси плазмоутворення термоперетворень вуглецю і генерації окиснювача з води, використовується потужнострумний електричний розряд, що горить в магнітному і електричному полях. Накладення на електричну дугу поздовжнього магнітного поля різної напруженості призводить до зміни форми дуги, її розмірів і швидкості обертання. Переміщення газоподібного провідника зі струмом (стовпа електричної дуги) на відміну від металевого - це переміщення заряджених частинок в електричному і магнітному полях.

Розглянемо рух плазми дуги при впливі на неї поздовжнього магнітного поля. Дуговий розряд, що обертається, по електроду захоплює нейтральні частинки вугільної суспензії. Частинки набувають в ньому кінетичну енергію як стохастичного руху (теплову), так і рух уздовж стовпа і в поперечному напрямку. Частина цих частинок зазнає збудження і іонізацію, після чого, виходячи з стовпа дуги, розсіюють надлишок енергії на нагрів навколишнього середовища (рис. 2.1).

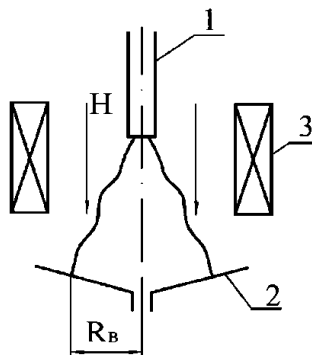


Рисунок 2.1 - Схема взаємодії магнітного поля соленоїда з електричним полем дугового розряду

Для спрощення фізичної картини процесу допустимо, що дуга не деформується і обертається подібно жорсткого провідника. При цьому передбачається, що перетин дуги постійний. Для визначення швидкості обертання шнура дуги може бути застосовна теорема про кінетичний момент [1]

$$\frac{dh_z}{dt} = \sum_{i=1}^n \tilde{m}_z(F),$$

де h_z – кінетичний момент всієї дуги щодо осі z , навколо якої обертається дуга;

$\sum_{i=1}^n \tilde{m}_z(F)$ - сума моментів сил, що діють на дугу.

При цьому диференціальне рівняння руху шнура дуги під дією магнітного поля може бути представлено у вигляді

$$J_z \ddot{\varphi} + R \dot{\varphi} + c\varphi = Q \sin pt, \quad (2.1)$$

де J_z - момент інерції руху дуги навколо осі z ;

R - коефіцієнт внутрішнього тертя;

c - коефіцієнт пружності середовища (при пропозиції, що коефіцієнт дифузії постійний);

$$Q = F = JB.$$

$$\ddot{\varphi} + \frac{R}{J_z} \dot{\varphi} + \frac{c}{J_z} \varphi = \frac{Q}{J_z} \sin pt. \quad (2.2)$$

З урахуванням $R = \text{const}$ перепишемо рівняння (2.2) у вигляді

$$\ddot{\varphi} + 2\beta \dot{\varphi} + \omega^2 \varphi = q \sin pt. \quad (2.3)$$

Загальне рішення рівняння (2.3) добре відомо і має вигляд [1,3]

| | | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 29 |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | | |

$$\varphi = Ae^{-\beta t} \sin(kt + \alpha), \quad (2.4)$$

де $k = \sqrt{\omega^2 - \beta^2}$.

Це рівняння визначає вільне загасаюче обертання дугового розряду. Провівши ряд математичних перетворень, отримаємо, що загальне рішення рівняння (2.4) складається з вільних коливань і власне вимушених коливань

$$\varphi = Ae^{-\beta t} \sin(kt + \alpha) + B \sin(pt - \delta). \quad (2.5)$$

Як видно з рівняння (2.5) амплітуда коливань не залежить від часу і пропорційна величині $Q = JB \sin pt$ періодичного збурення і залежить від частоти вимушених коливань

$$A(p) = \frac{1}{\sqrt{(\omega^2 - p^2)^2 + 4\beta^2 p^2}}. \quad (2.6)$$

Для визначення максимуму цієї амплітуди, знайдемо похідну цієї функції

$$A'(p) = \frac{(\omega^2 - p^2)2p - 4\beta^2 p}{\left[(\omega^2 - p^2)^2 + 4\beta^2 p^2 \right]^{3/2}} = 0.$$

Отримаємо рівняння $(\omega^2 - p^2) - 2\beta^2 = 0$, коріння якого дає частоту зовнішніх сил $(P = \sqrt{\omega^2 - 2\beta^2})$. При цьому максимальне зміщення дуги від осі з дорівнюватиме

$$R_c = \frac{q}{2\beta\sqrt{(\omega^2 - p^2)}} = \frac{JB' \sin pt}{2J_z \beta \sqrt{(\omega^2 - p^2)}}. \quad (2.7)$$

Ця формула показує, що амплітуда зсувів шнура розряду (по нижньому електроду), тим більше, чим більше магнітна індукція B' і чим менше опір β .

| | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 30 |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.ЕЕ2221.КРМ.2024-ПЗ | | | | |

енергії дугового розряду, збільшених теплопровідності, конвекції і випромінювання більш рівномірного розподілу енергії дугового розряду в реакційному просторі, інтенсивного змішування реагуючих компонентів з різною температурою, що значно збільшує ККД і продуктивність реакторів сумісного типу.

2.2 Методика розрахунку часу перетворень вуглецевмісної дисперсної частинки під дією газодинамічної складової енергії парової плазми

Для підвищення ефективності нагріву частинок розробляються пристрої, в яких основна технологічна зона обробки палива розташовується в області дугового розряду [1,3]. Частинки при цьому вводяться в канал безпосередньо поблизу електрода. Газ, який транспортує частинки одночасно є і плазмоутворюючим, а дисперсний матеріал рухається по лініях струму газу в зоні формування потоку плазми, що обертається власними електромагнітними силами, що сприяє залученню частинок в приосьової області та їх повної термообробці. Подача частинок в інші зони розряду не настільки ефективна [1,3].

Виділяються режими з відносно малою і великим завантаженням плазми твердою фазою. Для опису цих процесів застосовуються моделі одиночних сфер і гетерогенного середовища. Аналіз руху і нагрівання окремих частинок дозволяє отримати оціночну інформацію про граничні характеристики процесу плазмової обробки дисперсних матеріалів. Моделі гетерогенного середовища дають повнішу інформацію про теплофізичні параметри плазми і частинок, але є громіздкими при встановленні кількісного зв'язку між окремими параметрами процесу. У цьому випадку особливу важливість набувають якісні дослідження в одновимірному наближенні.

При моделюванні руху і нагрівання одиночних частинок - сфер в дуговому розряді нехтують впливом твердої фази на характеристики плазми, тобто враховують односторонній вплив потоку плазми на частинки. Це справедливо в

| | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 32 |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | |

разі, коли повні потоки кінетичної і теплової енергії частинок K_u, Q_u набагато менше відповідних величин плазми K, Q . Рух і нагрів дисперсного матеріалу електричною дугою описуються рівняннями, що визначають баланс сил і енергії на поверхні сферичної частинки [1,3]

$$m_u a_u = C_D \frac{\rho A}{8} |u - w_u| (u - w_u) + m_u g \quad (2.8)$$

$$\frac{m_u c_u}{A_u} \frac{dT_u}{d\tau} = \alpha(T_g - T_u) + \varepsilon_u \sigma T_u^4 + \varepsilon_u \Phi \quad (2.9)$$

де m_u, a_u, w_u, A_u, T_u - маса, прискорення, швидкість, площа поверхні і температура частинки відповідно;

T_g - температура газового середовища;

c_u - теплоємність матеріалу частинки;

α - коефіцієнт тепловіддачі;

ε_u - ступінь чорноти матеріалу частинок;

σ_φ - постійна Стефана - Больцмана;

C_D - коефіцієнт лобового опору;

g - прискорення вільного падіння.

Згідно [1,3], не враховуються сили, обумовлені градієнтом статичного тиску, приєднаної масою, нестационарного процесу прискорення, дифузіїю, електростатичним зарядом. Опір сферичний в високотемпературному потоці газу в широкому діапазоні чисел Рейнольдса і Маха береться з [1,3]

$$C_D = C_D(\text{Re}, M_D, \gamma) \quad (2.10)$$

де - число Маха;

γ - показник адіабати.

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 33 |

Використаний вираз описує всі дозвукові режими аж до переходу ламінарної течії в турбулентну і узгоджується з відомими експериментальними даними з точністю 3...15 %. Для зв'язку коефіцієнта тепловіддачі з параметрами плазми і частинки задається число Нуссельта у вигляді [1,3]

$$Nu = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33}, \quad (2.11)$$

де критерій подібності Нуссельта $Nu = ad/\lambda$ - безрозмірний параметр, що характеризує середню інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла і вільним або вимушеним потоком. Тут d - визначальний розмір тіла (частинки). Критерій Нуссельта є критерієм граничних умов. Зниження інтенсивності тепловіддачі за рахунок екранування паровим шаром під час випаровування частки не враховується, так як загальний ефект екранування за даними [1,3] становить 15...20 % і відповідає загальній похибці критеріальних співвідношень виду (2.11). При розрахунку нагрівання порошку в плазмі прийнятий безградієнтний нагрів частинок, так як критерій Біо, що характеризує зв'язок зміни поля температур в твердому тілі з умовами тепловіддачі на його поверхні, значно менше одиниці.

Для дослідження руху частинок в реакційному просторі необхідно знати діаметр d , швидкість введення частинки w_0 , густину $\rho_{\text{ч}}$, температури плавлення $T_{\text{пл}}$ і кипіння $T_{\text{к}}$, приховану питому теплоту плавлення $L_{\text{пл}}$ і теплоту пароутворення $L_{\text{к}}$ матеріалу частинок, температуру і компоненти швидкості плазми. У процесі рішення послідовно в кожному перетині визначаються осьові параметри руху і нагрівання частинок:

$$M_D = |u - w_{\text{ч}}| / v_{\text{зв}}, \quad Re = \rho |u - w_{\text{ч}}| d / \eta, \quad \alpha = Nu \cdot \lambda / d,$$

$$\text{час перебування частинки в плазмі } \tau = \int \frac{dz}{w}, \quad w = w_0 + \int a d\tau, \quad a, Pr, C_D$$

Параметри руху в радіальному напрямку визначаються аналогічно.

| | | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | | 34 |

Температура частки при нагріванні від початкової температури до температури плавлення і від температури плавлення до кипіння знаходиться за формулою

$$T_{ч} = T_{ч0} + \int_0^{\tau} \frac{qAd\tau}{mc_{пч}}$$

де q - потік теплоти через поверхню частинки, визначається правою частиною рівняння (2.9).

Під час плавлення збільшується акумульована часткою теплота за рахунок прихованої теплоти плавлення матеріалів, а збільшення температури частинки не відбувається. Час повного розплавлення частинки розраховується зі співвідношення

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} qd\tau = \frac{1}{6} \rho_{ч} L_{пл} d$$

де τ_1 - час досягнення температури плавлення;

τ_2 - закінчення плавлення.

Процес випаровування частинки розглядається з моменту досягнення температури кипіння. При цьому температура частинки залишається постійною, а підведена до частинки теплота йде на випаровування матеріалу. Зміна розміру частинки при випаровуванні знаходиться з умови $dQ = L_{к} dm$ (кількість теплоти, що підводиться до випаровуваної частинки $dQ = qAd\tau$) у вигляді

$$d = d_0 - \frac{2}{\rho_{ч} L_{к}} \int_{\tau_3}^{\tau} qd\tau$$

За викладеною методикою розраховується траєкторія руху і нагрівання

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | 35 |

частинок в реакційному просторі без урахування газодинамічних складових потоку гетерогенних частинок і складових окиснюючого середовища.

2.3 Математичне моделювання газодинаміки, теплообміну та енергоперетворення двофазного потоку вуглецевмісної сировини

2.3.1 Рівняння збереження маси нерозривності, кількості руху, енергії та хімічних реакцій перетворення в загальному вигляді

Математичне моделювання процесів, що відбуваються у двофазному середовищі (газ-частинки) реактора виконаємо на підставі концепції суцільного середовища [3,4], у відповідності з якою кожен складові суміші (фаза або компонента) розглядаються як набір взаємопроникних континуумів, що заповнюють один і той же об'єм, зайнятий сумішшю. Для кожного i -того континуума визначається густина ρ_i (маса i -тої складової в одиниці об'єму суміші), швидкість U_i , температура T_i , та інші параметри, які відносяться до свого континуума або складової суміші. Таким чином в кожній точці об'єму, який зайнятий сумішшю, буде визначено m густин ρ_i , m швидкостей U_i та ін, де m - кількість складових суміші.

Математична модель базується на основі фізичних законів збереження маси, імпульсу та енергії, тому потрібно записати балансові співвідношення для маси, імпульсу та енергії для кожної складової в деякому об'ємі суміші V , який є обмежений поверхнею S , враховуючи при цьому відповідний обмін не тільки з зовнішнім середовищем, але й обмін масою, імпульсом та енергією між складовими в середині об'єму V .

Для розрахунку руху і тепломасообміну багатокомпонентної суміші запишемо рівняння збереження маси, яке має вигляд [3,4]

$$\int_V \frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} dV = - \int_S \rho_i U_i^n dS + \int_V \sum_{j=1, j \neq i}^m f_{ji} dV,$$

| | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | 36 |

де n – відповідає проекції вектору руху на зовнішню нормаль n до поверхні S ;

f_{ji} - характеризує інтенсивність переходу маси j -ої складової суміші в i -ту.

Використовуючи формули Гауса-Остроградського отримаємо рівняння нерозривності потоку

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_i \vec{U}_i) = \sum_j f_{ji}, \quad (2.12)$$

де ρ_i, U_i - густина і швидкість i -ої складової суміші;

τ - час,

$\sum_j f_{ji}$ - характеризує інтенсивність переходу маси j -ої складової суміші в

i -ту.

Рівняння збереження імпульсу кожної складової можна записати у вигляді

$$\int_V \frac{\partial \rho_i U_i}{\partial \tau} dV = - \int_S \rho_i \vec{U}_i U_i^n dS + \int_S \sigma_i^n dS + \int_V \rho_i \vec{g}_i dV + \int_V \sum_{j=1, j \neq i}^m \vec{I}_{ji} dV,$$

де перша складова правої частини відповідає притоку імпульсу i -тої складової через поверхню S ; друга та третя складові – впливу зовнішніх поверхневих та масових сил.

Використовуючи формули Гауса-Остроградського можна отримати диференційне рівняння руху кожної складової.

$$\frac{\partial (\rho_i \vec{U}_i)}{\partial \tau} + \nabla^k \rho_i \vec{U}_i U_i^k = \nabla^k \sigma_i^k + \rho_i \vec{g}_i + \sum_j \vec{I}_{ji}, \quad (2.13)$$

де σ_i^k - тензор зовнішніх поверхневих сил,

| | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | 37 |

\vec{g}_i - вектор зовнішніх масових сил,

$\sum_j \vec{I}_{ji}$ - характеризує інтенсивність обміну імпульсом між j -ою та i -ою

складовими;

Запишемо балансове рівняння енергії для кожної складової

$$\int_V \frac{\partial \rho_i e_i}{\partial \tau} dV = - \int_S \rho_i e_i U_i^n dS + \int_S c_i^n dS + \int_V \rho_i \vec{g}_i \cdot U_i dV + \int_V \sum_{j=1, j \neq i}^m E_{ji} dV - \int_S q_i^n dS,$$

де перша складова правої частини відповідає притоку енергії i -тої складової за рахунок її руху через поверхню S ; друга та третя складові – роботі зовнішніх сил, яка характеризується вектором c_i , і масових сил, які припадають на i -ту складову.

Використовуючи формули Гауса-Остроградського можна отримати диференціальне рівняння енергії кожної складової.

$$\frac{\partial(\rho_i e_i)}{\partial \tau} + \nabla^k \rho_i e_i U_i^k = \nabla^k (c_i^k - q_i^k) + \rho_i \vec{g}_i \cdot \vec{U}_i + \sum_j E_{ji} + Q_{xp}, \quad (2.14)$$

де $e_i = u_i + \frac{U_i^2}{2}$ - сума питомих внутрішньої і кінетичної енергій,

c_i - вектор, який визначає роботу зовнішніх поверхневих сил ($c_i^n = \sigma_i^n \cdot \vec{U}_i$),

q_i - вектор, який визначає приток теплоти внаслідок теплопровідності,

$\sum_j E_{ji}$ - представляє інтенсивність обміну енергією між j -ою та i -ою

складовими,

Q_{xp} - визначає інтенсивність виділення теплоти внаслідок хімічних реакцій.

В рівняннях (2.12)-(2.14) ∇ - диференціальний оператор Гамільтона,

$\nabla^k = \frac{\partial}{\partial x^k}$ з підсумовуванням по верхньому індексу k .

| | | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | | | | | 38 |

Згідно [3,4] при перетворенні частинок вугілля протікають наступні реакції (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Основні реакції перетворень і швидкості реакцій

| № р-ції | Рівняння | Швидкість реакції |
|---------------------|-----------------------------|---|
| гетерогенні реакції | | |
| 1 | $2C + O_2 = 2CO + 220$ | $\frac{d}{d\tau}\rho_{O_2} = -32967 \cdot S \cdot \rho_{O_2} e^{-14500/T_p} = f_{1O_2}$ $\frac{d}{d\tau}\rho_C = f_{1C} = \frac{24}{32} f_{1O_2}$ $\frac{d}{d\tau}\rho_{CO} = f_{1CO} = -\frac{56}{32} f_{1O_2}$ |
| 2 | $C + O_2 = CO_2 + 395$ | $\frac{d}{d\tau}\rho_{O_2} = -329,67 \cdot S \cdot \rho_{O_2} e^{-8500/T_p} = f_{2O_2}$ $\frac{d}{d\tau}\rho_C = f_{2C} = \frac{12}{32} f_{2O_2}$ $\frac{d}{d\tau}\rho_{CO_2} = f_{2CO_2} = -\frac{44}{32} f_{2O_2}$ |
| 3 | $C + CO_2 = 2CO - 175$ | $\frac{d}{d\tau}\rho_{CO_2} = -3296,703 \cdot S \cdot \rho_{CO_2} e^{-17500/T_p} = f_{3CO_2}$ $\frac{d}{d\tau}\rho_C = f_{3C} = \frac{12}{44} f_{3CO_2}$ $\frac{d}{d\tau}\rho_{CO} = f_{3CO} = -\frac{56}{44} f_{3CO_2}$ |
| 4 | $C + H_2O = CO + H_2 - 132$ | $\frac{d}{d\tau}\rho_{H_2O} = -1260,073 \cdot S \cdot \rho_{H_2O} e^{-16000/T_p} = f_{5H_2O}$ $\frac{d}{d\tau}\rho_C = f_{5C} = \frac{12}{18} f_{5H_2O};$ $\frac{d}{d\tau}\rho_{CO} = f_{5CO} = -\frac{28}{18} f_{5H_2O};$ $\frac{d}{d\tau}\rho_{H_2} = f_{5H_2} = -\frac{2}{18} f_{5H_2O}$ |

В табл. 2.1 тепловий ефект має розмірність кДж/моль, S - поверхня частинок, на якій відбувається реакція. В загальному випадку $S=k\pi d^2 n$ (n - кількість частинок в одиниці об'єму, k - геометричний коефіцієнт форми -

відношення площі поверхні частинки до площі поверхні сфери з таким же об'ємом). Для вугільного пилу $k=1,62\dots 2,58$ [3,4].

2.3.2 Рівняння нерозривності, кількості руху, енергії для одномірного потоку

Рівняння нерозривності (2.12) для одномірного стаціонарного потоку прийме вигляд:

$$\frac{d}{dx}(\rho_i U_i) = \sum_j f_{ji} \quad (2.15)$$

Підсумуємо (2.15) по i для всіх газоподібних складових. Враховуючи, що $f_{ij} = -f_{ji}$, $\sum_i \rho_i U_i = \rho_g U_g$ отримаємо:

$$\frac{d}{dx}(\rho_g U_g) = f_p^g \quad (2.16)$$

де $f_p^g = f_{1O_2} + f_{2O_2} + f_{2CO_2} + f_{3CO_2} + f_{1CO} + f_{3CO} + f_{5CO} + f_{5H_2O} + f_{4H_2} + f_{5H_2} + f_{4CH_4} =$
 $= f_{O_2}^{1,2} + f_{CO_2}^{2,3} + f_{CO}^{1,3,5} + f_{5H_2O} + f_{H_2}^{4,5} + f_{4CH_4}$ - інтенсивність обміну масою між газом і частинками вугілля (індекси вгорі означають номери реакцій згідно таблиці 2.1).

Враховуючи що швидкості складових газу дорівнюють швидкості газу ($U_i = U_g$), з рівняння (2.15) можна отримати рівняння для зміни густини складових суміші.

Для складових газу:

$$\frac{d}{dx}(\rho_i U_g) = \sum_j f_{ij}; \quad \sum_j f_{ij} = \sum_j f_i^j = f_i; \quad \frac{d\rho_i}{dx} = \frac{1}{U_g} \cdot \left(f_i - \rho_i \cdot \frac{dU_g}{dx} \right),$$

i – компонент суміші;

j – номер реакції (верхній індекс).

Для частинок вугілля, що рухаються з швидкістю U_p :

$$\frac{d}{dx}(\rho_p U_p) = \sum_j f_{ip}; \quad \sum_j f_{ip} = \sum f_i^j = f_i; \quad \frac{d\rho_p}{dx} = \frac{1}{U_p} \cdot \left(f_c - \rho_p \frac{dU_p}{dx} \right).$$

Значення f_i для кожної складової суміші

$$\begin{aligned} f_{O_2} &= f_{O_2}^1 + f_{O_2}^2 + f_{O_2}^6 + f_{O_2}^7 + f_{O_2}^8; \\ f_{CO_2} &= f_{CO_2}^2 + f_{CO_2}^3 + f_{CO_2}^6 + f_{CO_2}^7; \\ f_{CO} &= f_{CO}^1 + f_{CO}^3 + f_{CO}^5 + f_{CO}^6; \quad f_{H_2O} = f_{H_2O}^5 + f_{H_2O}^7 + f_{H_2O}^8; \\ f_{H_2} &= f_{H_2}^4 + f_{H_2}^5 + f_{H_2}^8; \quad f_{CH_4} = f_{CH_4}^4 + f_{CH_4}^7; \\ f_{N_2} &= 0. \end{aligned}$$

Остаточно отримаємо

$$\frac{d}{dx} \rho_{O_2} = \frac{1}{U_g} \left(f_{O_2}^{1,2,6,7,8} - \rho_{O_2} \frac{d}{dx} U_g \right), \quad (2.17.1)$$

$$\frac{d}{dx} \rho_{CO_2} = \frac{1}{U_g} \left(f_{CO_2}^{2,3,6,7} - \rho_{CO_2} \frac{d}{dx} U_g \right), \quad (2.17.2)$$

$$\frac{d}{dx} \rho_{CO} = \frac{1}{U_g} \left(f_{CO}^{1,3,5,6} - \rho_{CO} \frac{d}{dx} U_g \right), \quad (2.17.3)$$

$$\frac{d}{dx} \rho_{H_2O} = \frac{1}{U_g} \left(f_{H_2O}^{5,7,8} - \rho_{H_2O} \frac{d}{dx} U_g \right), \quad (2.17.4)$$

$$\frac{d}{dx} \rho_{\text{H}_2} = \frac{1}{U_g} \left(f_{\text{H}_2}^{4,5,8} - \rho_{\text{H}_2} \frac{d}{dx} U_g \right), \quad (2.17.5)$$

$$\frac{d}{dx} \rho_{\text{CH}_4} = \frac{1}{U_g} \left(f_{\text{CH}_4}^{4,7} - \rho_{\text{CH}_4} \frac{d}{dx} U_g \right), \quad (2.17.6)$$

$$\frac{d}{dx} \rho_{\text{N}_2} = -\frac{1}{U_g} \rho_{\text{N}_2} \frac{d}{dx} U_g, \quad (2.17.7)$$

$$\frac{d}{dx} \rho_p = \frac{1}{U_p} \left(f_c^{1,2,3,4,5} - \rho_p \frac{d}{dx} U_p \right). \quad (2.17.8)$$

В рівнянні кількості руху не враховуємо зовнішні масові сили; з усіх зовнішніх поверхневих сил враховуємо тільки сили нормального тиску ($\sigma_i = -P_i$). Оскільки інтенсивність обміну імпульсом можна представити у вигляді [3,4] $\vec{I}_{ji} = \vec{R}_{ji} + f_{ji} \vec{U}_{ji}$, де \vec{R}_{ji} - віднесена до одиниці об'єму міжфазна сила (наприклад, сила тертя), а $f_{ji} \vec{U}_{ji}$ - зміна імпульсу за рахунок переходу j -ої фази в i -ту, тоді для одномірного стаціонарного потоку рівняння кількості руху прийме вигляд

$$\frac{d}{dx} (\rho_i U_i^2) = -\frac{dP_i}{dx} + \sum_j (R_{ji} + f_{ji} U_{ji}). \quad (2.18)$$

Підсумуємо (2.18) по i для всіх газоподібних складових, отримаємо

$$\frac{d}{dx} (\rho_g U_g^2) = -\frac{dP}{dx} + R_p^g + f_p^g U_p^g \quad (2.19)$$

де $P = \sum_i P_i$ - тиск в потоці газу,

R_p^g - віднесена до одиниці об'єму міжфазна сила при взаємодії частинок вугілля і газу,

$f_p^g U_p^g$ - характеризує обмін імпульсом між частинками вугілля і газом.

З (2.19) отримаємо

$$\frac{d}{dx}(\rho_g U_g^2 + P) = R_p^g + f_p^g U_p^g. \quad (2.20)$$

Віднесена до одиниці об'єму міжфазна сила тертя між частинками вугілля і газом визначається як:

$$R_p^g = -R_g^p = C_d \frac{\pi d_p^2}{4} \rho_g \frac{(U_g - U_p)^2}{2} n \quad (2.21)$$

де $C_d = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}$ - коефіцієнт опору частинки,

Re - число Рейнольдса ($Re < 500$);

μ_g - динамічна в'язкість газу.

Оскільки частинки в потоці газу повністю не згоряють, то число частинок в 1 м^3 газу (концентрація частинок) змінюється тільки за рахунок зміни їх швидкості.

Якщо масова витрата вугілля на вході в розрахункову область G_{p0} , ρ_{p0}^0 - справжня густина вугільної частинки, тоді за малий час Δt частинки пройдуть шлях Δl і займуть об'єм $\Delta V = \Delta l \cdot F$ (F - площа перетину). Число частинок N за рівні проміжки часу Δt буде однаковим:

$$N = \frac{6G_{p0} \cdot \Delta\tau}{\pi d_p^3 \rho_{p0}}$$

Враховуючи, що $\Delta\tau = \Delta l / U_p$, концентрація частинок в одиниці об'єму

$$n = \frac{N}{\Delta V} = \frac{6G_{p0}}{\pi d_p^3 \rho_{p0} F U_p} \quad (2.22)$$

Обмін імпульсом між частинками вугілля і газом визначаємо відповідно до схеми (рисунок 2.3).

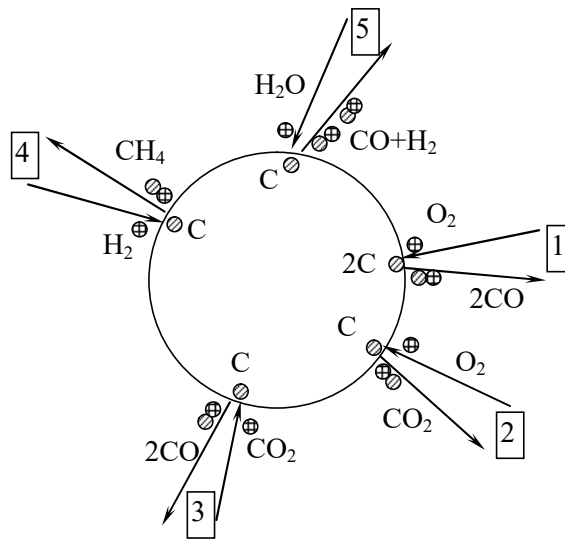


Рисунок 2.3 - Схема обміну імпульсом між частинками вугілля і газом

Газ втрачає імпульс: $(f_{O_2}^{1,2} + f_{CO_2}^3 + f_{H_2}^4 + f_{H_2O}^5) \cdot U_g$;

набуває імпульс: $(f_{CO}^{1,3,5} + f_{CO_2}^2 + f_{CH_4}^4 + f_{H_2}^5) \cdot U_p$.

Зміна імпульсу: $(f_{CO}^{1,3,5} + f_{CO_2}^2 + f_{CH_4}^4 + f_{H_2}^5) \cdot U_p - (f_{O_2}^{1,2} + f_{CO_2}^3 + f_{H_2}^4 + f_{H_2O}^5) \cdot U_g$.

Вугілля втрачає імпульс: $(f_{CO}^{1,3,5} + f_{CO_2}^2 + f_{CH_4}^4 + f_{H_2}^5) \cdot U_p$;

набуває імпульс: $(f_{O_2}^{1,2} + f_{CO_2}^3 + f_{H_2}^4 + f_{H_2O}^5) \cdot U_g$;

Зміна імпульсу: $(f_{O_2}^{1,2} + f_{CO_2}^3 + f_{H_2}^4 + f_{H_2O}^5) \cdot U_g - (f_{CO}^{1,3,5} + f_{CO_2}^2 + f_{CH_4}^4 + f_{H_2}^5) \cdot U_p$.

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 44 |

Тобто до вугільних частинок надходить імпульс $f_g^- U_g$, відходить від них $f_g^+ U_p$, і, відповідно, газу надається імпульс $f_g^+ U_p$, газ втрачає $f_g^- U_g$, де

$$f_g^+ = f_{CO}^{1,3,5} + f_{CO_2}^2 + f_{CH_4}^4 + f_{H_2}^5, \quad (2.23)$$

$$f_g^- = f_{O_2}^{1,2} + f_{CO_2}^3 + f_{H_2}^4 + f_{H_2O}^5. \quad (2.24)$$

Тоді, враховуючи що $f_p^g = f_g^+ + f_g^-$, $f_p^g U_p^g = f_g^+ U_p + f_g^- U_g$ з (2.20) і (2.16) отримаємо

$$\rho_g U_g \frac{dU_g}{dx} = -\frac{dP}{dx} + R_p^g + f_g^+ (U_p - U_g). \quad (2.25)$$

Рівняння енергії при $c_i = \sigma_i U_i = -P_i U_i$ без урахування роботи масових сил ($\vec{\rho}_i \vec{g}_i \cdot \vec{U}_i = 0$) і теплопровідності в газі ($q_i = 0$) для одновимірного стаціонарного випадку прийме вигляд:

$$\frac{d}{dx} (\rho_i U_i e_i) = -\frac{d}{dx} (P_i U_i) + \sum_j E_{ji} + Q_{x,p}^g, \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} Q_{x,p}^g = q_{6-8} = q_6 + q_7 + q_8 &= Q_6 \cdot \frac{1}{M_{CO}} \left(\frac{d\rho_{CO}}{d\tau} \right)_6 + Q_7 \cdot \frac{1}{M_{CH_4}} \left(\frac{d\rho_{CH_4}}{d\tau} \right)_7 + Q_8 \cdot \frac{1}{M_{H_2}} \left(\frac{d\rho_{H_2}}{d\tau} \right)_8 = \\ &= Q_6 \cdot \frac{1}{M_{CO}} |f_6^{CO}| + Q_7 \cdot \frac{1}{M_{CH_4}} |f_7^{CH_4}| + Q_8 \cdot \frac{1}{M_{H_2}} |f_8^{H_2}|. \end{aligned}$$

Підсумуємо (2.25) по i для всіх газоподібних складових. Враховуючи, що $U_i = U_2$ і $E_{ji} = -E_{ij}$ отримаємо:

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 45 |

$$\frac{d}{dx}(\rho_g U_g e_g) = -\frac{d}{dx}(P_g U_g) + E_p^g + \sum_i Q_{x,p}^g, \quad (2.27)$$

де $e_g = u_g + \frac{U_g^2}{2}$ - питома енергія газу;

E_p^g - визначає інтенсивність обміну енергією між вугільними частинками і газом.

Внутрішня енергія газу:

$$u_g = C_{v_g} T_g = (C_{p_g} - R) T_g = C_{p_g} T_g - R T_g = C_{p_g} T_g - \frac{P}{\rho_g}, \quad (2.28)$$

де C_{v_g} , C_{p_g} - питома теплоємність газу при постійному об'ємі і тиску відповідно, $R = P / (\rho_g T_g)$ - газова стала.

Враховуючи (2.28) і залежність для питомої енергії газу, можна отримати (2.27) у вигляді:

$$\frac{d}{dx}(\rho_g U_g C_{p_g} T_g + \frac{1}{2} \rho_g U_g^3) = E_p^g + \sum_i Q_{x,p}^g \quad (2.29)$$

або ураховуючи (2.16)

$$\frac{d}{dx}(\rho_g U_g C_{p_g} T_g) + \frac{1}{2} U_g^2 \frac{d}{dx}(\rho_g U_g) + \frac{1}{2} \rho_g U_g^2 \frac{dU_g}{dx} = E_p^g + \sum_i Q_{x,p}^g$$

$$\frac{d}{dx}(\rho_g U_g C_{p_g} T_g) + \frac{1}{2} U_g^2 f_p^g + \rho_g U_g^2 \frac{dU_g}{dx} = E_p^g + \sum_i Q_{x,p}^g. \quad (2.30)$$

З рівняння стану

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 46 |

$$P = T_g \sum_i \rho_i R_i, \quad (2.31)$$

де R_i - газові сталі складових газу.

Продиференціюємо (2.31):
$$\frac{dP}{dx} = \frac{dT_g}{dx} \sum \rho_i R_i + T_g \frac{d}{dx} \sum \rho_i R_i.$$

Визначимо похідну $\frac{d}{dx}(U_g \sum R_i \rho_i) = U_g \frac{d}{dx}(\sum R_i \rho_i) + \sum R_i \rho_i \frac{d}{dx}(U_g)$ або

$$\frac{d}{dx} \sum (U_g R_i \rho_i) = U_g \frac{d}{dx} \sum R_i \rho_i + \frac{d}{dx}(U_g) \sum R_i \rho_i.$$

Помножимо (2.15) на R_i , матимемо
$$\frac{d}{dx}(R_i \rho_i U_g) = R_i \sum_j f_{ji}.$$

Просумуємо по i

$$\sum_i \frac{d}{dx} (R_i \rho_i U_g) = \sum_i R_i \sum_j f_{ji},$$

де

$$\sum_i R_i \sum_j f_{ji} = R_{O_2} f_{O_2}^{1,2,6,7,8} + R_{CO_2} f_{CO_2}^{2,3,6,7} + R_{CO} f_{CO}^{1,3,5,6} + R_{H_2O} f_{H_2O}^{5,7,8} + R_{H_2} f_{H_2}^{4,5,8} + R_{CH_4} f_{CH_4}^{4,7}$$

Позначимо $\sum_i R_i \sum_j f_{ji} \equiv \sum R_i f_i.$

Тоді

$$\frac{d}{dx} \sum R_i \rho_i = \frac{1}{U_g} \sum R_i f_i - \frac{1}{U_g} \sum R_i \rho_i \frac{dU_g}{dx} = \frac{1}{U_g} \sum R_i f_i - \frac{P}{U_g T_g} \frac{dU_g}{dx}$$

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P}{T_g} \frac{dT_g}{dx} + T_g \frac{1}{U_g} \sum R_i f_i - T_g \frac{P}{U_g T_g} \frac{dU_g}{dx},$$

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 47 |

отримаємо

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P}{T_g} \frac{dT_g}{dx} + \frac{T_g}{U_g} \left(\sum_i R_i \sum_j f_{ji} \right) - \frac{P}{U_g} \frac{dU_g}{dx}. \quad (2.32)$$

Рівняння (2.30) можна записати у вигляді

$$Cp_g T_g \frac{d}{dx} (\rho_g U_g) + \rho_g U_g \frac{d}{dx} (Cp_g T_g) + \frac{1}{2} U_g^2 f_p^g + \rho_g U_g^2 \frac{dU_g}{dx} = E_p^g + \sum Q_{xp}^g$$

$$Cp_g T_g f_p^g + \rho_g U_g \frac{d}{dx} (Cp_g T_g) + \frac{1}{2} U_g^2 f_p^g + \rho_g U_g^2 \frac{dU_g}{dx} = E_p^g + \sum Q_{xp}^g$$

$$\rho_g U_g Cp_g \frac{dT_g}{dx} + \rho_g U_g^2 \frac{dU_g}{dx} + \left(Cp_g T_g + \frac{1}{2} U_g^2 \right) f_p^g = E_p^g + \sum_i Q_{x,p}^g. \quad (2.33)$$

Рівняння (2.25), (2.32), (2.33) утворюють систему, відносно $\frac{dP}{dx}$, $\frac{dT_g}{dx}$, $\frac{dU_g}{dx}$.

Підставимо в рівняння кількості руху $\frac{dP}{dx}$ з рівняння стану

$$\rho_g U_g \frac{dU_g}{dx} + \frac{P}{T_g} \frac{dT_g}{dx} - \frac{P}{U_g} \frac{dU_g}{dx} + \frac{T_g}{U_g} \sum R_i f_i = R_p^g + f_g^+ (U_p - U_g)$$

$$\left(\rho_g U_g - \frac{P}{U_g} \right) \frac{dU_g}{dx} + \frac{P}{T_g} \frac{dT_g}{dx} + \frac{T_g}{U_g} \sum R_i f_i = R_p^g + f_g^+ (U_p - U_g).$$

Помножимо це рівняння на $\frac{T_g}{P} Cp_g \rho_g U_g$

$$\frac{T_g C_{p_g} \rho_g U_g}{P} \left(\rho_g U_g - \frac{P}{U_g} \right) \frac{dU_g}{dx} + C_{p_g} \rho_g U_g \frac{dT_g}{dx} = \frac{T_g C_{p_g} \rho_g U_g}{P} \left(R_p^g + f_g^+(U_p - U_g) - \frac{T_g}{U_g} \sum R_i f_i \right)$$

і відніmemo його з (2.33)

$$\begin{aligned} & \rho_g U_g^2 \frac{dU_g}{dx} + \left(C_{p_g} T_g + \frac{1}{2} U_g^2 \right) f_p^g - \frac{T_g C_{p_g} \rho_g U_g}{P} \left(\rho_g U_g - \frac{P}{U_g} \right) \frac{dU_g}{dx} = \\ & = E_p^g + \sum Q_{xp}^g - \frac{T_g C_{p_g} U_g}{P} \left(R_p^g + f_g^+(U_p - U_g) - \frac{T_g}{U_g} \sum R_i f_i \right) \end{aligned}$$

Тоді

$$\frac{dU_g}{dx} = \frac{E_p^g + \sum Q_{xp}^g - \frac{T_g C_{p_g} U_g}{P} \left(R_p^g + f_g^+(U_p - U_g) - \frac{T_g}{U_g} \sum R_i f_i \right) - \left(C_{p_g} T_g + \frac{1}{2} U_g^2 \right) f_p^g}{\rho_g U_g^2 - \frac{T_g \rho_g C_{p_g} U_g}{P} \left(\rho_g U_g - \frac{P}{U_g} \right)},$$

враховуючи, що газова стала газу $R = \frac{P}{\rho_g T_g}$.

Остаточно отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{dU_g}{dx} = & \left\{ E_p^g + \sum_i Q_{x,p}^g - \frac{C_{p_g}}{R} U_g \left[R_p^g + f_g^+(U_p - U_g) - \frac{T_g}{U_g} \sum_i R_i f_i \right] - \right. \\ & \left. - \left[C_{p_g} T_g + \frac{1}{2} U_g^2 \right] f_p^g \right\} / \left[\rho_g U_g^2 - \frac{C_{p_g}}{R} (\rho_g U_g^2 - P) \right]; \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_g}{dx} = & \frac{T_g}{P} \left[R_p^g + f_g^+(U_p - U_g) - \frac{T_g}{U_g} \sum_i R_i f_i \right] - \\ & - \frac{T_g}{P} \left[\rho_g U_g - \frac{P}{U_g} \right] \frac{dU_g}{dx}, \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\text{де } \sum_i R_i f_i = R_{\text{O}_2} f_{\text{O}_2}^{1,2,6,7,8} + R_{\text{CO}_2} f_{\text{CO}_2}^{2,3,6,7} + R_{\text{CO}} f_{\text{CO}}^{1,3,5,6} + R_{\text{H}_2\text{O}} f_{\text{H}_2\text{O}}^{5,7,8} + R_{\text{H}_2} f_{\text{H}_2}^{4,5,8} + R_{\text{CH}_4} f_{\text{CH}_4}^{4,7}.$$

Рівняння кількості руху для системи частинок отримаємо з (2.18) при $P_p=0$:

$$\frac{d}{dx}(\rho_p U_p^2) = R_g^p + f_g^p U_g^p, \quad (2.36)$$

де R_g^p - віднесена до одиниці об'єму міжфазна сила при взаємодії газу з частинками вугілля, $f_g^p U_g^p$ - характеризує обмін імпульсом між газом і частинками вугілля за рахунок переходу твердого вуглецю в газоподібні продукти згоряння.

З (2.36) після перетворень отримаємо рівняння для зміни швидкості системи частинок:

$$\frac{dU_p}{dx} = \frac{1}{\rho_p U_p} (R_g^p + f_g^p (U_g - U_p)). \quad (2.37)$$

Рівняння енергії для частинок вугілля має вигляд, аналогічний (2.27)

$$\frac{d}{dx}(\rho_p U_p e_p) = E_g^p + Q_{x,p}^p, \quad (2.38)$$

де E_g^p - визначає інтенсивність обміну енергією між газом і вугільними частинками, $Q_{x,p}^p$ - визначає інтенсивність виділення теплоти внаслідок хімічних реакцій, що протікають на поверхні частинок.

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 50 |

$$Q_{x,p}^p = \left[Q_1 \cdot \left(\frac{d\rho_c}{d\tau} \right)_1 + Q_2 \cdot \left(\frac{d\rho_c}{d\tau} \right)_2 + Q_3 \cdot \left(\frac{d\rho_c}{d\tau} \right)_3 + Q_4 \cdot \left(\frac{d\rho_c}{d\tau} \right)_4 + Q_5 \cdot \left(\frac{d\rho_c}{d\tau} \right)_5 \right] \cdot \frac{1}{M_c} =$$

$$= \left[Q_1 \cdot 0.75 \cdot |f_1^{O_2}| + Q_2 \cdot 0.375 \cdot |f_2^{O_2}| + Q_3 \cdot 0.2727 \cdot |f_3^{CO}| + Q_4 \cdot 3 \cdot |f_4^{CH_4}| + Q_5 \cdot 0.666667 \cdot |f_5^{H_2O}| \right] \cdot \frac{1}{M_c}$$

Враховуючи рівняння руху (2.36) і $e_p = Cp_p T_p - \frac{P_p}{\rho_p} + \frac{U_p^2}{2} = Cp_p T_p + \frac{U_p^2}{2}$,

отримаємо

$$\frac{d}{dx} \left(\rho_p U_p \left(Cp_p T_p + \frac{U_p^2}{2} \right) \right) = \sum_j E_{jp} + Q_{xp}$$

$$\frac{d}{dx} (\rho_p U_p Cp_p T_p) + \frac{d}{dx} \left(\frac{U_p^3}{2} \right) = \sum_j E_{jp} + Q_{xp}$$

$$Cp_p T_p \frac{d}{dx} (\rho_p U_p) + \rho_p U_p \frac{d}{dx} (Cp_p T_p) + \frac{1}{2} \rho_p U_p^2 \frac{dU_p}{dx} + \frac{1}{2} U_p \frac{d(U_p^2)}{dx} = \sum_j E_{jp} + Q_{xp}$$

$$Cp_p T_p f_c + \rho_p U_p Cp_p \frac{dT_p}{dx} + \frac{1}{2} \rho_p U_p^2 \frac{dU_p}{dx} + \frac{1}{2} U_p (R_g^p - f_g^- U_g - f_g^+ U_p) = \sum_j E_{jp} + Q_{xp}$$

Розглянемо останні дві складові лівої частини наведеного рівняння:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho_p U_p^2 \frac{1}{\rho_p U_p} (R_g^p - f_g^- (U_g - U_p)) + \frac{1}{2} U_p (R_g^p - f_g^- U_g - f_g^+ U_p) = \\ & = \frac{1}{2} U_p R_g^p - \frac{1}{2} U_p f_g^- (U_g - U_p) + \frac{1}{2} U_p R_g^p - \frac{1}{2} U_p f_g^- U_g - \frac{1}{2} U_p f_g^+ = \\ & = U_p R_g^p - \frac{1}{2} U_p f_g^- U_g + \frac{1}{2} U_p f_g^- U_p - \frac{1}{2} U_p f_g^- U_g - \frac{1}{2} U_p f_g^+ U_p = \\ & = U_p R_g^p - U_p f_g^- U_g + \frac{1}{2} U_p^2 (f_g^- - f_g^+) \end{aligned}$$

| | | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.ЕЕ2221.КРМ.2024-ПЗ | | | | | 51 |

Остаточно отримаємо

$$\frac{dT_p}{dx} = \frac{1}{\rho_p U_p C_{p_p}} \left(E_g^p + Q_{x,p}^p - U_p R_g^p - C_{p_p} T_p f_c + + U_p U_g f_g^- - 0,5 U_p^2 (f_g^- - f_g^+) \right). \quad (2.39)$$

Величину E_p^g , що характеризує передачу енергії від частинок вугілля до газу можна записати у вигляді:

$$\sum_i \sum_j E_{ij} = \sum_i \sum_j W_{ji} + \sum_i \sum_j Q_{ij} + \sum_i \sum_j f_{ij} \left(u_{ji} + \frac{1}{2} U_{ji}^2 \right)$$

$$E_p^g = W_p^g + Q_p^g + f_p^g \left(u_p^g + \frac{1}{2} U_p^{g^2} \right). \quad (2.40)$$

Тут $W_p^g=0$ - передача енергії за рахунок роботи сил взаємодії між частинками і газом (тобто вважаємо, що робота сили опору частинок йде на зміну внутрішньої енергії тільки частинок вугілля).

2.3.3 Рівняння руху та теплообміну з частинкою

Теплообмін між частинками і газом відбувається внаслідок тепловіддачі і випромінювання

$$Q_p^g = \alpha_p (T_p - T_g) \pi d^2 n k. \quad (2.41)$$

Коефіцієнт тепловіддачі α_p визначали залежно від числа Нусельта використовуючи відому формулу Фреслінга:

$$Nu = \frac{\alpha_p d_p}{\lambda_g} = 2 + 0,55 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33},$$

де $Pr = \frac{\mu_g C_{p_g}}{\lambda_g}$ - число Прандтля.

Остання складова в (2.40) визначає зміну енергії внаслідок переходу частини маси вугілля в газоподібні продукти перетворення, при цьому переносяться питомі внутрішня і кінетична енергії

$$U_i^p = C_{v_i}^p \cdot T_p = (C_{p_i} - R_i) \cdot T_p$$

$$U_i^g = C_{v_i}^g \cdot T_g = (C_{p_i} - R_i) \cdot T_g$$

$$\begin{aligned} f_p^g U_p^g &= (f_{CO}^{1,3,5} \cdot U_{CO}^p + f_{CO_2}^2 \cdot U_{CO_2}^p + f_{CH_4}^4 \cdot U_{CH_4}^p + f_{H_2}^5 \cdot U_{H_2}^p) + \\ &+ (f_{O_2}^{1,2} \cdot U_{O_2}^g + f_{CO_2}^3 \cdot U_{CO_2}^g + f_{H_2}^4 \cdot U_{H_2}^g + f_{H_2O}^5 \cdot U_{H_2O}^g) = \\ &= (f_{CO}^{1,3,5} \cdot C_{v_{CO}}^p + f_{CO_2}^2 \cdot C_{v_{CO_2}}^p + f_{CH_4}^4 \cdot C_{v_{CH_4}}^p + f_{H_2}^5 \cdot C_{v_H}^p) \cdot T_p + \\ &+ (f_{O_2}^{1,2} \cdot C_{v_{O_2}}^g + f_{CO_2}^3 \cdot C_{v_{CO_2}}^g + f_{H_2}^4 \cdot C_{v_{H_2}}^g + f_{H_2O}^5 \cdot C_{v_{H_2O}}^g) \cdot T_g \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \cdot [f_{CO}^{1,3,5} \cdot U_p^2 + f_{CO_2}^2 \cdot U_p^2 + f_{CH_4}^4 \cdot U_p^2 + f_{H_2}^5 \cdot U_p^2] + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot [f_{O_2}^{1,2} \cdot U_g^2 + f_{CO_2}^3 \cdot U_g^2 + f_{H_2}^4 \cdot U_g^2 + f_{H_2O}^5 \cdot U_g^2] = \\ &= \frac{1}{2} [f_g^+ \cdot U_p^2 + f_g^- \cdot U_g^2] = f_p^g \cdot \frac{1}{2} \cdot U_p^{g^2} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Що входить в рівняння (2.39) E_p^g визначається аналогічно (2.30)

$$E_g^p = W_g^p + Q_g^p + f_g^p (u_g^p + \frac{1}{2} U_g^{p^2}), \quad (2.44)$$

де $W_g^p = R_p^g (U_g - U_p)$ - робота сил аеродинамічного опору,

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.ЕЕ2221.КРМ.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 53 |

$$Q_g^p = \left[\alpha_p (T_g - T_p) + \sigma \varepsilon \left(\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 \right) \right] \pi d^2 n \quad (2.45)$$

де T_s - температура випромінюючого об'єму; σ - стала Стефана-Больцмана, ε - степінь чорноти частинок вугілля.

Для розв'язку системи диференційних рівнянь (2.17, 2.34, 2.35, 2.37, 2.39) використовували граничні умови.

В початковому перерізі (при $x=0$) вважали відомими:

- концентрації складових газу

$$\rho_{O_2} = \rho_{O_2}^0 \quad \rho_{CO_2} = \rho_{CO_2}^0 \quad \rho_{CO} = \rho_{CO}^0 \quad \rho_{H_2O} = \rho_{H_2O}^0 \quad \rho_{H_2} = \rho_{H_2}^0$$

$$\rho_{CH_4} = \rho_{CH_4}^0 \quad \rho_{N_2} = \rho_{N_2}^0 ;$$

- концентрація частинок вугілля $\rho_P = \rho_P^0 ;$

- швидкість газу та частинок $U_g = U_{g0} \quad U_p = U_{p0} ;$

- температури газу та частинок $T_g = T_{g0} \quad T_p = T_{p0} .$

Для визначення теплофізичних властивостей складових вуглецевмісних частинок, що перетворюються, та окиснювача, програмуванням на ЕОМ, застосовані апроксимаційні формули, які побудовані на основі поліномів за даними таблиць [3,4]. Вони мають єдину структуру і потребують тільки одного обчислення відповідної степені температури газу чи частинок. Це дозволяє під час тестування алгоритму розрахунку раціонально використовувати ресурси ЕОМ та значно зменшити час розрахунку. Теплоємність частинок визначалась за формулою [4], яка відповідає теплоємності антрациту

$$Cp_4 = 0,992 + 0,000209t.$$

3 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

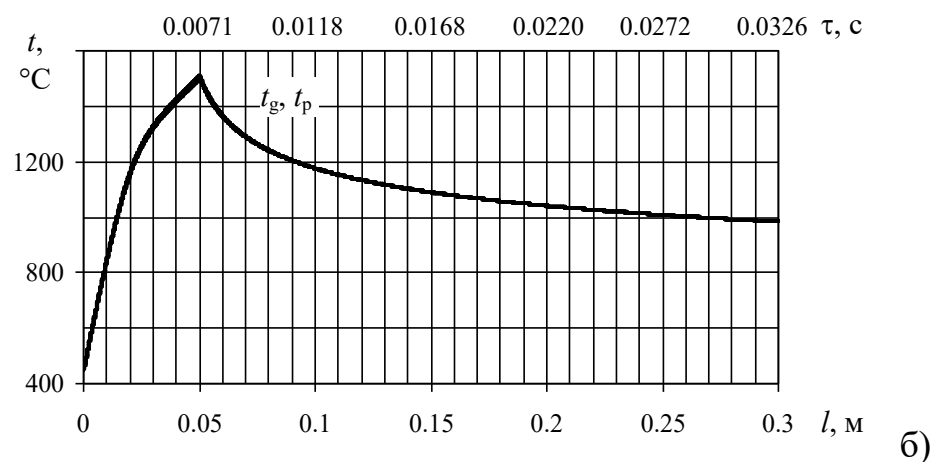
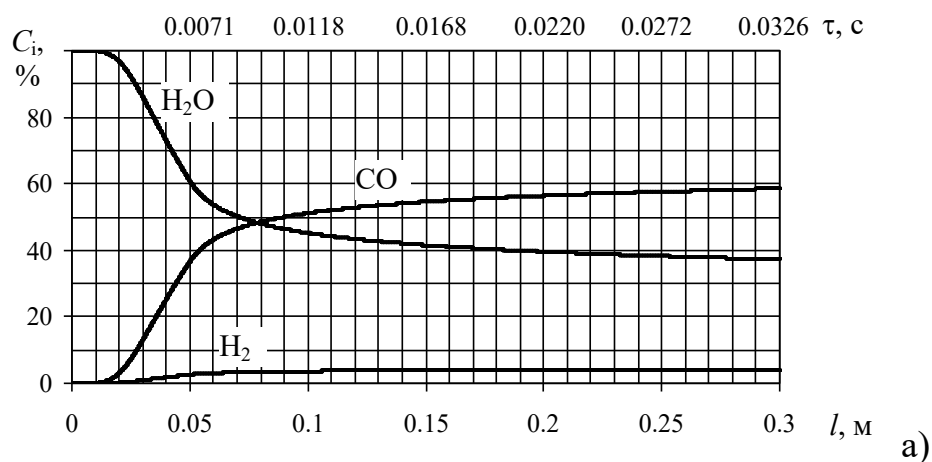
Виконано розрахунок часу перетворення вуглецевмісних частинок різної дисперсності під впливом газодинамічної складової енергії потоку, що вводиться в реакційний простір.

Взаємодія газодинамічних параметрів в процесі термічного перетворення вуглецю – складові газу, їх відносний вихід, час нагріву дисперсних частинок вуглецю до його повної конверсії (τ), максимальне значення температури газу (t_q) і частинки (t_u) від потужності енергії (N), що вводиться в реакційний простір і дисперсності середовища (δ), представлені в таблиці 2.2 в загальному вигляді і розраховані за рівняннями 2.12 – 2.45.

Таблиця 2.2 – Газодинамічні параметри процесу перетворень вуглецю

| d , мкм | N_k , кВт | t_{max} , С | τ , с (1800K) | $t_{вих}$, С | Масова частка, % | | | Об'ємна частка % | | |
|-----------|-------------|---------------|--------------------|---------------|------------------|----------------|------------------|------------------|----------------|------------------|
| | | | | | CO | H ₂ | H ₂ O | CO | H ₂ | H ₂ O |
| 50 | 100 | 1500.9 | | 983.5 | 58.55 | 4.18 | 37.27 | 33.45 | 33.43 | 33.12 |
| 50 | 150 | 1786.6 | 0.004457 | 1188.5 | 76.47 | 5.46 | 18.07 | 42.24 | 42.23 | 15.53 |
| 50 | 200 | 2070.4 | 0.003121 | 1479.1 | 86.19 | 6.16 | 7.65 | 46.76 | 46.79 | 6.46 |
| 50 | 250 | 2331.7 | 0.002386 | 1827.8 | 90.32 | 6.45 | 3.23 | 48.65 | 48.64 | 2.71 |
| 100 | 100 | 1602.2 | 0.006264 | 1061.5 | 54.69 | 3.91 | 41.4 | 31.46 | 31.49 | 37.05 |
| 100 | 150 | 1883.7 | 0.00387 | 1257.3 | 71.89 | 5.13 | 22.98 | 40.06 | 40.02 | 19.92 |
| 100 | 200 | 2144.5 | 0.002793 | 1496.3 | 81.72 | 5.84 | 12.44 | 44.70 | 44.72 | 10.58 |
| 100 | 250 | 2381.7 | 0.00219 | 1763 | 86.88 | 6.21 | 6.91 | 47.07 | 47.10 | 5.82 |
| 150 | 100 | 1657.3 | 0.005821 | 1111.7 | 52.01 | 3.71 | 44.28 | 30.09 | 30.05 | 39.85 |
| 150 | 150 | 1937.7 | 0.003703 | 1300 | 68.59 | 4.9 | 26.51 | 38.44 | 38.45 | 23.11 |
| 150 | 200 | 2191.1 | 0.002719 | 1513 | 78.36 | 5.6 | 16.04 | 43.12 | 43.15 | 13.73 |
| 150 | 250 | 2421.2 | 0.002157 | 1741.8 | 84 | 6 | 10 | 45.76 | 45.76 | 8.47 |

Окремі залежності загальних параметрів взаємодії приведені на рисунках 2.4 – 2.6.



а) та температури газу і частинок б) по довжині реактора при корисній потужності електричної дуги 100 кВт, витраті вугілля 40 кг/год та діаметрі частинок 50 мкм.

Рисунок 2.4 – Масова частка складових газової фази:

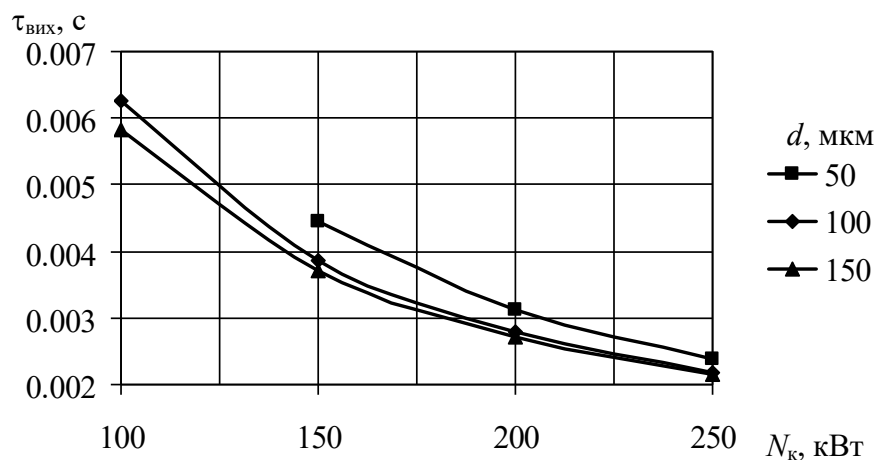


Рисунок 2.5 – Час, за який досягається температура частинок 1800 К при витраті 40 кг/год і різній потужності, що вводиться

| | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |
|-----|------|-------------|--------|------|

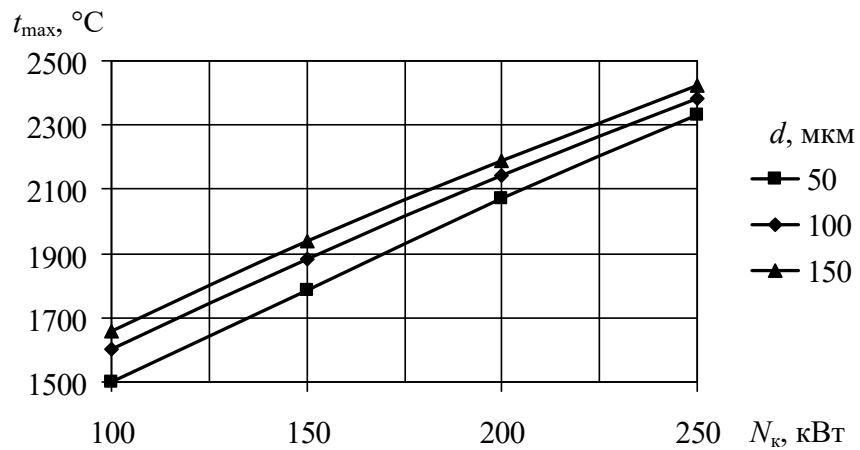


Рисунок 2.6 – Залежність температури частинок різного розміру від потужності, що вводиться при незмінному розході вугілля 40 кг/год

Їх аналіз показує (рисунок 2.4а), що збільшення часу прогріву частинок, які деякою швидкістю рухаються в продовж реакційної зони (l), призводить до різкого підвищення концентрації складових газової фази CO і H_2 та зменшенню окиснювача H_2O , що обумовлено продовженням взаємодії вуглецю з паровим окисником до його повної конверсії. Так, згідно з рисунком 2.4а, максимальне значення виходу газової фази – CO - 51%; H_2 – 45 % при залишку окиснювача – 4 % спостерігається через 0,0118 с, коли частинка розміром 50 мкм досягає температури 1800...2000 К, що відповідає шляху переміщення частинок в реакційній зоні (довжина зони), рівному 0,1 м. Подальше збільшення часу прогріву частинок від 0,0118 с до 0,0326 с суттєво не призводить до зміни складу газової фази, яка при його значенні 0,0326 с, що відповідає довжині реакційної зони 0,3 м, становить 59 % CO , 38 % H_2 та 3 % H_2O . Аналізуючи дані залежності, які наведені на рисунку 2.4б, видно, що при збільшенні часу прогріву частинок до 0,0071 с відбувається значне підвищення температури газу та частинок, яка складає 1520°C, що відповідає оптимальному значенню температури повної конверсії вуглецю в паровому середовищі. При цьому довжина реакційної зони при якій досягається дана температура складає 0,05 м. При збільшенні часу прогріву частинок до 0,0018 с, що відповідає довжині

діаметру частинок від 100 мкм до 150 мкм призводить до зниження часу прогріву від 0,0045 с до 0,0039 с, тобто на 0,0006 с швидше, а збільшення діаметра частинок від 50 мкм до 100 мкм знижує час прогріву від 0,0039 с до 0,0036 с, тобто на 0,0003 с. Таким чином, зменшення діаметру частинок понад 150 мкм призведе тільки до підвищення енергоємності процесу подрібнення вугілля.

Наведений аналіз отриманих залежностей дозволяє встановити певні конструктивні та технологічні параметри процесу термохімічних перетворень вуглецевмісних середовищ, зокрема, визначено, що довжина реакційної зони становить 0,1 м, потужність електричної дуги – 150 кВт при продуктивності 40 кг/год, а час досягнення температури 1800 К частинками діаметром 150 мкм складає 0,0039 с.

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 59 |

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Визначено, що серед способів інтенсифікації тепло- і масообміну в реакційній камері особливу увагу заслуговує підвищення температури в ній, що зумовлює істотну позитивну зміну теплових і кінетичних параметрів процесу газифікації.

Встановлено, що спосіб плазмової газифікації вуглецевмісних середовищ доцільно реалізовувати в плазмохімічному реакторі сумісного типу, відкрита електрична дуга якого значно прискорює процес тепло- і масообміну в реакційному просторі за рахунок високої і регульованої температури.

Розроблено методику математичного моделювання процесу перетворення дисперсної вуглецевмісної сировини в потоці енергії водяної плазми і дугового розряду. Визначено вплив параметрів потоку енергії дугового розряду на нагрів вугільної частинки в реакційному просторі при спільному впливі двох видів теплообміну. Встановлено залежність темпу конверсії вуглецю від величини температурного поля, в якому протікають хімічні реакції термоперетворень. Максимальне прискорення процесу конверсії вуглецю має місце в діапазоні зміни температури в реакційній камері від 2000 К до 3000 К

Розроблено методику та виконано розрахунок основних параметрів реакційної камери реактора розділеного типу потужністю $N=150$ кВт. Визначено, що в реакційній камері час конверсії полідисперсних частинок становить 0,0039 с при продуктивності перетворень вугілля АШ 40 кг/год, діаметрі частинок 150 мкм і температурі 1800 К.

Результати роботи можливо використовувати при проектуванні нових та дослідженні існуючих електродугових реакторів для енергоперетворення вуглецевмісної сировини

| | | | | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 60 |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | 02.15.ЕЕ2221.КРМ.2024-ПЗ | | | | |

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Спосіб і технічні засоби інтенсифікації та управління процесом термічних перетворень мінеральних середовищ, в тому числі вугілля різного ступеня метаморфізму: звіт НДР (заключ.): Д/б 89 / ІГТМ НАН України; кер. Булат А.Ф.; виконавець.: Шумриков В.В. - Дніпропетровськ, 2005. - 159с. - № 0103U001622. - Інв. 235.

2 Bulat, A. Sublimation and combustion of coal particles in the erosion laser torch / A. Bulat, V. Shumrikov, V. Osenny // European materials research society spring meeting, Strasbourg (France), 2005. - P. 605-609.

3 Науково-технічне обґрунтування параметрів та удосконалення технічних рішень пристроїв пароплазмової переробки мінеральних середовищ, в тому числі відходів вуглевидобування та вуглезбагачення: звіт НДР (заключ.): ПІ-60-11 / ІГТМ НАН України; кер. Булат А.Ф.; вик.: Холявченко Л.Т. - Дніпропетровськ, 2014. - 182 с. - № 0111U005129. - Інв. 7541.

4 Bulat A. Plasma reactor for thermochemical preparation of coal-air mixture before its burning in the furnaces. VII International scientific-practical conference "School Underground Mining" / A. Bulat, O. Voloshyn, O. Zhevzhik // Annual Scientific-Technical Collection "Mining of Mineral Deposits". – Netherlands: CRC Press / Balkema, 2013. – P. 39 – 44.

| | | | | | | |
|-----|------|-------------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | 02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата | | 61 |