

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними та економічними процесами

---

Інтелектуальні системи енергоспостачання

---

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
магістра

на тему: Дослідження динаміки горіння пилоповітряної суміші в однородному потоці

за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті  
зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

---

Виконав: студент групи ЕС2326:

  
\_\_\_\_\_ / Владислав ГРИЦАСНКО /

Керівник:   
\_\_\_\_\_ / доцент Ірина ПОТАПЧУК /

Нормоконтролер:   
\_\_\_\_\_ / доцент Ірина ПОТАПЧУК /

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


Студент   
\_\_\_\_\_

Дніпро – 2025 рік

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними та економічними 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 БОСИЙ

Дата 01.04.2024

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу магістр з електроенергетики,  
електротехніки та електромеханіки

студенту Грицаєнку Владиславу Олександровичу

1. Тема роботи: “ Дослідження динаміки горіння пилоповітряної суміші  
в однородному потоці”.

Керівник роботи: Потапчук Ірина Юріївна, к.т.н., доцент

затверджені наказом від "01 " 04 2024 р. № 246ст

2. Строк подання студентом роботи: 15.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

Густина, діаметр, початкова температура, початкова швидкість частинок  
вугілля, початкова температура газу, витрата вугілля, витрата повітря, масова  
частка повітря та азоту на вході в жарову трубу.

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

4.1 Математична модель згоряння пило повітряної суміші

4.2 Визначення теплофізичних властивостей складових газу

4.3 Визначення конструктивних розмірів жарової труби за допомогою  
математичного моделювання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Схема обміну імпульсу між частинками вугілля і газу. 2. Залежності температури газу і частинок вугілля від довжини жарової труби. 3. Залежності концентрації складових газу від довжини жарової труби, швидкостей руху частинок вугілля та газу.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури	15.11.2024	
2	Математична модель згоряння пило повітряної суміші	12.12.2024	
3	Визначення конструктивних розмірів жарової труби	25.12.2024	
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2025	
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	21.01.2025	

Студент Владислав ГРИЦАЄНКО

Керівник роботи Ірина ПОТАПЧУК


  


## ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

другого (магістерського) рівня вищої освіти Грицаєнка В.О. на тему:  
«Дослідження динаміки горіння пилоповітряної суміші»

Складова кваліфікаційної роботи	Кількість	Обсяг
Пояснювальна записка	1	76 стор.
Графічна частина (за наявності)	-	-
Демонстраційний матеріал	1	12 слайдів
Електронна частина (за наявності): назва файлу з розширенням	-	-

Керівник:  / Ірина ПОТАПЧУК /

Нормоконтролер:  / Ірина ПОТАПЧУК /

Завідувач кафедри ІСЕ:  / Дмитро БОСИЙ /

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 76 сторінок, 3 частини, 16 рисунків, 1 таблиця, 20 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – процеси та хімічні реакції, що відбуваються при згорянні пилоповітряної суміші в однородному потоці.

Мета роботи – розробка математичної моделі, проведення розрахунків та обґрунтування динаміки згорання пилоповітряної суміші в однородному потоці.

Методи дослідження – аналітичні методи розрахунку, чисельні методи розв'язку диференціальних рівнянь, розрахунок хімічних реакцій згорання пилоповітряної суміші.

На основі законів збереження маси, імпульсу та енергії побудована математична модель згорання частинок вугілля в пилоповітряній суміші. Рівняння моделі враховують основні хімічні реакції, вміст вуглецю в вугіллі, концентрації повітря, дисперсність частинок та їх коефіцієнт форми. Проведено розрахунки для одновимірного потоку.

В результаті отримано залежності зміни температур частинок і газу, їх швидкості та концентрації продуктів реакцій на довжині 1 м. Визначено положення максимуму температур в залежності від діаметру частинок та їх коефіцієнту форми.

Ключові слова: ПИЛОПОВІТРЯНА СУМІШ, КОТЕЛ, ОДНОРОДНИЙ ПОТІК, ЧИСЕЛЬНИЙ МЕТОД, ДИСПЕРСНІСТЬ РОЗПИЛЮВАННЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	11
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗГОРЯННЯ ПИЛО ПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ	
2.1 Рівняння нерозривності, кількості руху, енергії в загальному вигляді .....	15
2.2 Рівняння хімічних реакцій згорання вугілля.....	20
2.3 Рівняння нерозривності, кількості руху, енергії для одномірного потоку.....	29
2.4 Теплофізичні властивості складових газу .....	47
2.5 Метод розрахунку.....	51
3 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ.....	52
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	73
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	74

					02.15.EE2321.KPM.2025–ПЗ			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Дослідження процесів тепломасообміну в системі охолодження трубоелектрозварного агрегату	Літера	Аркуш	Акрушів
Розробив		Грицаєнко				М Д	7	75
Консульт.						МОНУ, УДУНТ, ІСЕ ЕС2326		
Керівник		Потапчук						
Н. контр.		Потапчук						
Зав. каф.		Босий						

## ВСТУП

**Постановка проблеми.** В світовій та вітчизняній теплоенергетиці при розтоплюванні пиловугільних котлів і для стабілізації горіння пиловугільного факелу використовують природний газ або топочний мазут. В світі використовується більш ніж 50 млн. т мазуту на ці заходи.

В даний час використовуються промислові енергоустановки на основі спалювання органічного палива в киплячому шарі і у факелі. При спалюванні твердого палива в киплячому шарі процес важче піддається регулюванню. Тому для крупних енергоустановок, наприклад ТЕС, найпоширенішими є енергоустановки із спалюванням вугільного пилу у факелі з ініціацією горіння за рахунок використання мазуту або природного газу.

Однією з актуальних проблем паливно-енергетичного комплексу України є вимушене використання в котлах ТЕС низькорекційного вугілля. Застосування існуючих технологій характеризується значним механічним і хімічним недопалюванням, використанням природного газу або мазуту для стабілізації процесу горіння, крім того, застосування мазутного розпалу супроводиться значними викидами шкідливих речовин в атмосферу.

Ще гостріше вказані вище проблеми стоять в теплоенергетиці для котлів малої потужності (продуктивність за парою 35-75 т/год) з турбулентними вихровими пиловугільними пальниками. Навантаження змінюється від 50 до 100 % повної потужності котла при цьому постійно потрібне мазутне підсвічування пальників. І, як наслідок, мазут стає другим основним паливом, а шкідливі викиди збільшуються.

Для економії природного газу і мазуту, що імпортуються на Україну проводиться розробка і вдосконалення методу спалювання вугільного пилу за допомогою плазмових технологій при використанні електродугових нагрівачів газу - плазмотронів.

**Актуальність дослідження.** Зниження якості видобутого вугілля та необхідність підвищення ефективності його використання в умовах старого

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

обладнання робить дослідження процесів горіння пилоповітряної суміші надзвичайно актуальним. Це дозволяє розробити менш енерговитратні та більш екологічно чисті технології для енергетичної та хімічної галузей. Математичне моделювання як альтернатива фізичному дозволяє знизити витрати на дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими напрямками діяльності кафедри.** Обране дослідження безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт в Українському державному університеті науки та технологій.

**Метою** цього дослідження є розрахунок кінетики горіння пилоповітряної суміші вугілля в одномірному потоці.

**Методи дослідження** засновані на математичному моделюванні процесів руху та тепло масообміну аеросуміші з урахуванням хімічних перетворень твердих і газоподібних речовин з використанням законів збереження маси хімічних елементів, кількості руху і енергії твердих і газоподібних речовин, кінетичних рівнянь для швидкості реакцій.

**Об'єкт дослідження.** Процеси горіння пилоповітряної суміші вугілля.

**Предмет дослідження.** Математична модель горіння пилоповітряної суміші, що базується на рівняннях збереження маси, імпульсу та енергії, а також на впливі геометричних та фізико-хімічних характеристик частинок вугілля на ефективність згоряння.

**Наукова новизна.** Розроблена математична модель враховує основні хімічні реакції, вміст вуглецю в вугіллі, концентрації повітря, дисперсність частинок та їх геометричний коефіцієнт форми.

Проведено чисельні розрахунки, які дозволяють визначити залежності температур, швидкостей і концентрацій продуктів реакцій на довжині каналу для різних діаметрів частинок.

Встановлено вплив коефіцієнта форми частинок і їх розмірів на інтенсивність горіння і положення зони максимального тепловиділення.

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Результати дослідження створюють передумови для оптимізації процесів спалювання пилоподібного вугілля, що має практичне значення для енергетичної та екологічної сфер.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Основні положення доповідалися здобувачем і обговорювалися на міжнародній конференції European congress of scientific discovery (м. Мадрид, 2024 р.).

**Публікації.**

Грицаєнко В. О., Потапчук І. Ю., Жевжик О. В., Резнік А. В. Математичне моделювання згоряння пилоповітряної суміші . *European congress of scientific discovery. Proceedings of the 1st International scientific and practical conference.* Barca Academy Publishing. Madrid, Spain. 2024. Рр. 203-207. URL: <https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-discovery-29-31-12-2024-madrid-ispaniya-arhiv/>

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В даний час помітно знизилася якість вугілля (зольність, калорійність), що видобувається, а отже підвищилася потреба у високореакційному підсвічуючому паливі – природному газі і мазуті (частка мазуту в тепловому балансі котла досягає 40 %).

Спалювання низькосортного палива призводить до погіршення запалювання і вигорання палива, нестабільному горінню, посиленню шлакування, зростанню механічного недопалу і збільшенню забруднення шкідливими викидами [1]. Крім того, виробництво топочного мазуту в найближчому майбутньому внаслідок більшої глибини переробки нафти (до 85 %) скоротиться, що призведе подорожчання мазуту з одночасним зниженням його якості [2]. У зв'язку з цими проблемами з'явився гострий брак нових технологій більш економічного способу спалювання твердих палив.

В [3] дається короткий огляд етапів розвитку способів спалювання твердого палива з оцінкою переваг і недоліків. Розглядається область їх застосування. Обґрунтовуються переваги спалювання низькореакційних твердих палив з використанням плазмово-енергетичних технологій. Як висновок, ці технології є найбільш доцільними для спалювання низько реакційних палив.

Одними з перших зайнялися розглядом процесів горіння вугільного пилу Бабій В.И. і Куваєв Ю.Ф. В [4] наведені особливості процесу горіння вугільного пилу, а також спалювання її для вугілля різних марок, наведений зразковий розрахунок пиловугільного факелу методом Рунге-Кутта.

Раціональним з теплофізичної та економічної точки зору є використання методу термохімічної плазмової підготовки палива до спалювання (ТППП). Сутність цього методу полягає в розділенні пиловугільного потоку на дві або більше частини, одна з яких нагрівається плазмою електродуги до температури практично повного виділення летючих вугілля і часткової газифікації коксівного залишку, тобто одержують високореакційне двокомпонентне паливо (горючий газ + коксівний залишок), здатне запалити потік, що залишився,

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

аеросуміші і стабілізувати горіння в топці [1,5], тобто високі температури плазмового струменя сприяють ефективному запалюванню пиловугільного факелу навіть при відносно низькій середній температурі [6]. Спроба реалізації даного способу спалювання вугільного пилу в Україні є на Кураховській ТЕС і на Придніпровській ТЕС.

Є свідчення, [7], що завдяки високій температурі плазми потрапляючі в неї частинки палива одержують тепловий удар і дробляться, внаслідок чого збільшується поверхня взаємодії палива з окислювачем і інтенсифікуються хімічні реакції. В умовах таких температур відбувається високошвидкісний нагрів, а також можливе протікання реакції в ізотермічних умовах, внаслідок чого кількість парогазових продуктів, що виділилися, може бути в 2-3 рази більше, ніж при повільному нагріві. Напівкокс, що залишився, містить 50-70 % органічної маси початкового палива, має більш пористу структуру, ніж початкове вугілля і горить активніше.

В [7] представлено опис стенду для вивчення ЗВЧ-плазмової технології підпалу і спалювання вугільного пилу. Приведені результати експериментів, отриманих на цьому стенді. Обговорюються перспективи впровадження такої технології в промислові пальники котлів ТЕС. На даний момент існують більш ефективні способи організації спалювання вугільного пилу. Цей метод не отримає широкого застосування більші енерговитрати.

Ефективність використання для потреб енергетики низькосортного вугілля може бути істотно підвищена або шляхом його плазмохімічної обробки, або в процесі самого горіння палива, або шляхом попередньої газифікації палива в спеціальних плазмохімічних реакторах і в плазмових пальниках [8].

Наявність електричних розрядів сприяє інтенсифікації процесів тепломасообміну і збільшенню ефективності спалювання палива. Крім того, в процесі підготовки палива вони дозволяють здійснювати екстракцію газів-відновників з вугілля і витягувати мікроелементи із золи палива.

Термохімічна підготовка палива може проводитися різними способами залежно від типу палива [9].

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фізико-хімічні основи дії низькотемпературної плазми на горіння органічних вуглеводневих палив полягають в тому, що в плазмових областях через високу температуру генеруються електрони, іони, збуджені атоми і фотони. Крім того, вугільний пил згоряє у присутності електричних полів з утворенням заряджених частинок. Їх наявність в газовій фазі характерна для пилової плазми і може змінити характеристики процесу горіння. Генерація електронів, позитивних ( $C^+$ ,  $H^+$ ,  $CO^+$ ,  $N^+$  і ін.) і негативних ( $O^-$ ,  $H^-$  і ін.) іонів, збуджених атомів і фотонів приводить до інтенсифікації дисоціації молекул, виникненню хімічно активних радикалів ( $CH$ ,  $CN$ ,  $NH$  і др.) і поліпшенню процесу горіння [10,11].

В [11] представлений короткий аналіз перспектив використання електророзрядних і плазмових технологій. Показано, що низькотемпературна плазма може ефективно застосовуватися для інтенсифікації процесів горіння твердих палив.

Процес горіння вугільного пилу відбувається дуже складно і різноманітно. Існують всього 8 основних рівнянь реакцій горіння вугільного пилу [13]; в [12,13] представлені рівняння кінетики горіння і розрахунок констант кінетики горіння.

В [14] декілька параграфів присвячені розгляду питання про багатофазні середовища, зокрема приведено рівняння руху багатофазного середовища, фізичні властивості цих середовищ.

В [15] є глави, присвячені особливостям факельного спалювання низькосортного вугілля, фізико-хімічним характеристикам вугільного пилу, параметрам запалювання і горіння.

В [16] розглянуті питання хімічної кінетики, хімічно рівноважні і нерівноважні системи, гомогенні і гетерогенні рідини і їх фізико-хімічні особливості течії.

В [17] є рівняння для розрахунку руху і тепломасообміну багатокомпонентної суміші: нерозривності, кількості руху, енергії, а також розглянуті особливості фізичних властивостей багатокомпонентних середовищ.

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Розрахунок кінетики горіння пилоподібного палива дозволяє визначити оптимальні режимні параметри для організації процесу спалювання в енергетичних апаратах.

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		14

## 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗГОРЯННЯ ПИЛО ПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ

### 2.1 Рівняння нерозривності, кількості руху, енергії в загальному вигляді

Опис методами механіки суцільного середовища різноманітних сумішей, як гомогенних, так і гетерогенних, пов'язано з введенням поняття багатошвидкісного континуума і визначенням взаємопроникаючого руху складових суміші.

Відповідно до [17] багатошвидкісний континуум – це сукупність  $m$  континуумів, кожний з яких відноситься до своєї складової (фази або компоненти) суміші і заповнює один і той же об'єм, зайнятий сумішшю. Для кожного  $m$ -того континуума визначається густина (приведена)  $\rho_i$  (маса  $i$ -тої складової в одиниці об'єму суміші), швидкість  $U_i$  ( $i=1, \dots, m$ ), а потім й інші параметри, які відносяться до свого континуума і своєї складової суміші. Таким чином в кожній точці об'єму, який зайнятий сумішшю, буде визначено  $m$  густин  $\rho_i$ ,  $m$  швидкостей  $U_i$  та ін.

Визначимо поняття густини суміші  $\rho$ , середньомасову швидкість  $U$ , дифузійна швидкість  $W_i$ :

$$\rho = \sum_{i=1}^m \rho_i \quad \rho U = \sum_{i=1}^m \rho_i U_i \quad (2.1, 2.2)$$

$$W_i = U_i - U \quad \left( \sum_{i=1}^m \rho_i W_i = 0 \right) \quad (2.3, 2.4)$$

В багатошвидкісному середовищі існують такі поняття як субстанціональні похідні  $d_i/d\tau$ ,  $d/d\tau$ , які відповідно пов'язані з рухом  $i$ -тої компоненти та з рухом середовища в цілому:

$$\frac{d_i}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} + U_i \nabla = \frac{\partial}{\partial \tau} + U_i^k \frac{\partial}{\partial x^k} = \frac{\partial}{\partial \tau} + U_i^k \nabla^k \quad (2.5)$$

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

$$\frac{d}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} + U\nabla = \frac{\partial}{\partial \tau} + U^k \frac{\partial}{\partial x^k} = \frac{\partial}{\partial \tau} + U^k \nabla^k \quad (2.6)$$

де  $\nabla$  - диференціальний оператор Гамільтона.

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

Для розрахунку руху і тепломасообміну багатокomпонентної суміші запишемо рівняння [17]:

Рівняння мас має вигляд:

$$\int_V \frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} dV = - \int_S \rho_i U_i^n dS + \int_V \sum_{j=1, j \neq i}^m f_{ji} dV, \quad (2.7)$$

де  $n$  – відповідає проекції вектора на зовнішню нормаль  $n$  до поверхні  $S$ ;

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

Після використання формули Гауса-Остроградського

$$\int_S A U^n dS = \int_V \nabla^k A U^k dV \quad (2.8)$$

отримаємо рівняння нерозривності нерозривності

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_i \vec{U}_i) = \sum_j f_{ji} \quad (2.9)$$

де  $\rho_i, U_i$  - густина і швидкість  $i$ -ої складової суміші  $\tau$  - час,

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

$i$ -ту;

Рівняння імпульсів кожної складової можна записати у вигляді:

$$\int_V \frac{\partial \rho_i U_i}{\partial \tau} dV = - \int_S \rho_i \vec{U}_i U_i^n dS + \int_S \sigma_i^n dS + \int_V \rho_i \vec{g}_i dV + \int_V \sum_{j=1, j \neq i}^m \vec{I}_{ji} dV, \quad (2.10)$$

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

Також після використання формули Гауса-Остроградського можна отримати диференціальне рівняння руху кожної складової кількості руху

$$\frac{\partial(\rho_i \vec{U}_i)}{\partial \tau} + \nabla^k \rho_i \vec{U}_i U_i^k = \nabla^k \sigma_i^k + \rho_i \vec{g}_i + \sum_j \vec{I}_{ji} \quad (2.11)$$

де  $\sigma_i^k$  - тензор зовнішніх поверхневих сил,  $\vec{g}_i$  - вектор зовнішніх масових сил,  $\sum_j \vec{I}_{ji}$  - характеризує інтенсивність обміну імпульсом між  $j$ -ою та  $i$ -ою складовими;

Запишемо балансове рівняння для енергії для кожної складової:

$$\int_V \frac{\partial \rho_i e_i}{\partial \tau} dV = - \int_S \rho_i e_i U_i^n dS + \int_S c_i^n dS + \int_V \rho_i \vec{g}_i U_i dV + \int_V \sum_{j=1, j \neq i}^m E_{ji} dV - \int_S q_i^n dS, \quad (2.12)$$

					02.15.EC2321.KPM.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

‘е 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.

Також після використання формули Гауса-Остроградського можна отримати диференціальне рівняння енергії кожної складової енергії

$$\frac{\partial(\rho_i e_i)}{\partial \tau} + \nabla^k \rho_i e_i U_i^k = \nabla^k (c_i^k - q_i^k) + \rho_i \vec{g}_i \cdot \vec{U}_i + \sum_j E_{ji} + Q_{xp} \quad (2.13)$$

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 (2.1)-(2.3)  $\nabla$  - диференціальний оператор Гамільтона,

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

Згідно [13] при горінні частинок вугілля протікають наступні реакції (табл. 1).

Рівняння нерозривності (2.1) для одномірного стаціонарного потоку прийме вигляд:

$$\frac{d}{dx}(\rho_i U_i) = \sum_j f_{ji} \quad (2.14)$$

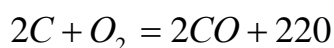
					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вважаємо частинки сферичними. Наявність пор враховуємо коефіцієнтом форми. Горіння проходить як на поверхні пор, так і в їхньому об'ємі, а також на зовнішній поверхні частинок.

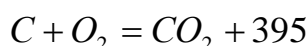
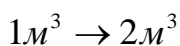
Відстань між частинками залежить від їх концентрації в газовому середовищі.

## 2.2 Рівняння хімічних реакцій згорання вугілля

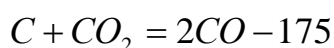
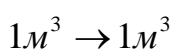
Приймемо наступний механізм реагування з врахуванням балансу маси і зміни об'єму в реакціях, які є основними при горінні вугільного пилю [13]:



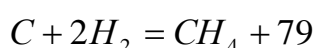
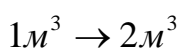
$$1) 24\text{кг} + 32\text{кг} = 56\text{кг}$$



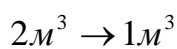
$$2) 12\text{кг} + 32\text{кг} = 44\text{кг}$$



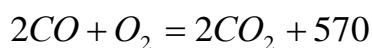
$$3) 12\text{кг} + 44\text{кг} = 56\text{кг}$$



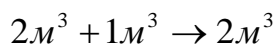
$$4) 12\text{кг} + 4\text{кг} = 16\text{кг}$$



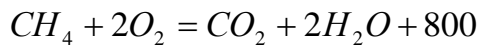
$$5) 12\text{кг} + 18\text{кг} = 280\text{кг} + 2\text{кг}$$



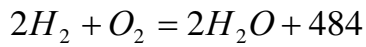
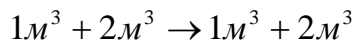
$$6) 56\text{кг} + 32\text{кг} = 88\text{кг}$$



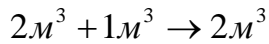
					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$$7) 16\text{кг} + 64\text{кг} = 44\text{кг} + 36\text{кг}$$



$$8) 4\text{кг} + 32\text{кг} = 36\text{кг}$$



Тепловий ефект має розмірність кДж/моль. Реакції 1-5 є гетерогенними, а 6-8 - гомогенними. Реакції 1, 3, 5 проходять зі збільшенням кількості молів; реакції 4, 6, 8 проходять зі зменшенням кількості молів.

Дуже складним є питання вираховування констант швидкостей відповідних реакцій. Дані різноманітних дослідів носять частіше суперечливий характер.

В загальному вигляді швидкість реакції має вигляд:

$$q_i = \beta k_{Si}^C \quad (2.15)$$

де  $\beta$  – стехіометричний коефіцієнт, що показує відношення ваги реагуючої речовини до ваги витраченої речовини.

$k_{Si}^C$  - це складна функція, яка залежить від характеру реагування (кінетичний або дифузійний), від співвідношення отриманих окисів CO та CO<sub>2</sub> та ін.

Розпишемо рівняння швидкості кожної з наведених раніше реакцій.

$$q_1 = -\frac{32}{24} k_{S_1}^C = -\frac{273}{ST} \frac{d\rho_{O_2}}{d\tau} = \frac{32}{56} \frac{273}{ST} \frac{d\rho_{CO}}{d\tau} = \frac{0.9 \cdot 10^7}{T} \rho_{O_2} \cdot e^{-14500/T} \text{ кг } O_2 / \text{м}^2 \text{ с}$$

де  $\frac{d\rho_{O_2}}{d\tau}$  - зміна густини речовини у часі.

Отримаємо:

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$-\frac{273}{ST} \frac{d\rho_{O_2}}{d\tau} = \frac{0.9 \cdot 10^7}{T} \rho_{O_2} \cdot e^{-14500/T} \Rightarrow \frac{d\rho_{O_2}}{d\tau} = -32967S\rho_{O_2} \cdot e^{-14500/T} = f_{1O_2}$$

$$\frac{d\rho_C}{d\tau} = f_{1C} = \frac{24}{32} f_{1O_2}$$

$$\frac{d\rho_{CO}}{d\tau} = f_{1CO} = -\frac{56}{32} f_{1O_2}$$

де S – питома поверхня реагування, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>

$$q_2 = -\frac{32}{12} k_{S_2}^C = -\frac{273}{ST} \frac{d\rho_{O_2}}{d\tau} = \frac{32}{44} \frac{273}{ST} \frac{d\rho_{CO_2}}{d\tau} = \frac{0.9 \cdot 10^5}{T} \rho_{O_2} \cdot e^{-8500/T} \text{ кг O}_2 / \text{м}^2 \text{ с}$$

Отримаємо:

$$-\frac{273}{ST} \frac{d\rho_{O_2}}{d\tau} = \frac{0.9 \cdot 10^5}{T} \rho_{O_2} \cdot e^{-8500/T} \Rightarrow \frac{d\rho_{O_2}}{d\tau} = -329,67S\rho_{O_2} \cdot e^{-8500/T} = f_{2O_2}$$

$$\frac{d\rho_C}{d\tau} = f_{2C} = \frac{12}{32} f_{2O_2}, \quad \frac{d\rho_{CO_2}}{d\tau} = f_{2CO_2} = -\frac{44}{32} f_{2O_2}$$

$$q_3 = -\frac{44}{12} k_{S_3}^C = -\frac{273}{ST} \frac{d\rho_{CO_2}}{d\tau} = \frac{44}{56} \frac{273}{ST} \frac{d\rho_{CO_2}}{d\tau} = \frac{0.9 \cdot 10^6}{T} \rho_{O_2} \cdot e^{-17500/T} \text{ кг CO}_2 / \text{м}^2 \text{ с}$$

Отримаємо:

$$-\frac{273}{ST} \frac{d\rho_{CO_2}}{d\tau} = \frac{0.9 \cdot 10^6}{T} \rho_{O_2} \cdot e^{-17500/T} \Rightarrow$$

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{d}{d\tau} \rho_{\text{CO}_2} = -3296,703 \cdot S \cdot \rho_{\text{CO}_2} e^{-17500/T_p} = f_{3\text{CO}_2}$$

$$\frac{d}{d\tau} \rho_{\text{C}} = f_{3\text{C}} = \frac{12}{44} f_{3\text{CO}_2}, \quad \frac{d}{d\tau} \rho_{\text{CO}} = f_{3\text{CO}} = -\frac{56}{44} f_{3\text{CO}_2}$$

$$q_4 = -\frac{4}{12} k_{S_4}^C = -\frac{273}{ST} \frac{d\rho_{\text{H}_2}}{d\tau} = \frac{4}{16} \frac{273}{ST} \frac{d\rho_{\text{CH}_4}}{d\tau} = \frac{0.136 \cdot 10^6}{T} \rho_{\text{O}_2} \cdot e^{-13500/T} \text{ кг CH}_4/\text{м}^2\text{с}$$

Отримаємо:

$$-\frac{273}{ST} \frac{d\rho_{\text{H}_2}}{d\tau} = \frac{0.136 \cdot 10^6}{T} \rho_{\text{CH}_4} \cdot e^{-13500/T} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{d}{d\tau} \rho_{\text{H}_2} = -498,168 \cdot S \cdot \rho_{\text{CH}_4} e^{-13500/T_p} = f_{4\text{H}_2}$$

$$\frac{d}{d\tau} \rho_{\text{C}} = f_{4\text{C}} = \frac{12}{4} f_{4\text{H}_2}$$

$$\begin{aligned} q_5 &= -\frac{18}{12} k_{S_5}^C = -\frac{273}{ST} \frac{d\rho_{\text{H}_2\text{O}}}{d\tau} = \frac{18}{28} \frac{273}{ST} \frac{d\rho_{\text{CO}}}{d\tau} = \frac{18}{2} \frac{273}{ST} \frac{d\rho_{\text{H}_2}}{d\tau} = \\ &= \frac{0.344 \cdot 10^6}{T} \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot e^{-16000/T} \text{ кг H}_2\text{O}/\text{м}^2\text{с} \end{aligned}$$

Отримаємо:

$$-\frac{273}{ST} \frac{d\rho_{\text{H}_2\text{O}}}{d\tau} = \frac{0.344 \cdot 10^6}{T} \rho_{\text{O}_2} \cdot e^{-16000/T} \Rightarrow$$

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Rightarrow \frac{d}{d\tau} \rho_{\text{H}_2\text{O}} = -1260,073 \cdot S \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} e^{-16000/T_p} = f_{5\text{H}_2\text{O}}$$

$$\frac{d}{d\tau} \rho_{\text{C}} = f_{5\text{C}} = \frac{12}{18} f_{5\text{H}_2\text{O}}, \quad \frac{d}{d\tau} \rho_{\text{CO}} = f_{5\text{CO}} = -\frac{28}{18} f_{5\text{H}_2\text{O}}$$

$$\frac{d}{d\tau} \rho_{\text{H}_2} = f_{5\text{H}_2} = -\frac{2}{18} f_{5\text{H}_2\text{O}}$$

$$q_6 = -\frac{d\rho_{\text{CO}}}{d\tau} = -\frac{56}{32} \frac{d\rho_{\text{O}_2}}{d\tau} = \frac{56}{88} \frac{d\rho_{\text{CO}_2}}{d\tau} =$$

$$= \frac{0,1 \cdot 10^{15}}{T^{1,5}} \rho_{\text{CO}} \cdot \rho_{\text{O}_2}^{0,25} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}^{0,5} \cdot e^{-16000/T} \text{ кгCO}_2/\text{M}^3\text{c}$$

Отримаємо:

$$\frac{273}{T} \frac{T}{273} \frac{d}{d\tau} \rho_{\text{CO}} = -\frac{0,1 \cdot 10^{15}}{T_g^{1,5}} \left(\frac{273}{T}\right)^{1+0,25+0,5} \left(\frac{T}{273}\right)^{1+0,25+0,5} \rho_{\text{CO}} \rho_{\text{O}_2}^{0,25} \rho_{\text{H}_2\text{O}}^{0,5} e^{-16000/T_g} = f_{6\text{CO}}$$

$$\frac{d}{d\tau} \rho_{\text{CO}} = -\frac{0,1 \cdot 10^{15}}{(273)^{0,75}} \frac{1}{T^{0,75}} \rho_{\text{CO}} \rho_{\text{O}_2}^{0,25} \rho_{\text{H}_2\text{O}}^{0,5} e^{-16000/T_g} = f_{6\text{CO}}$$

$$\frac{d}{d\tau} \rho_{\text{CO}} = -\frac{1,489 \cdot 10^{12}}{T_g^{0,75}} \rho_{\text{CO}} \rho_{\text{O}_2}^{0,25} \rho_{\text{H}_2\text{O}}^{0,5} e^{-16000/T_g} = f_{6\text{CO}}$$

$$\frac{d}{d\tau} \rho_{\text{O}_2} = f_{6\text{O}_2} = \frac{32}{56} f_{6\text{CO}}, \quad \frac{d}{d\tau} \rho_{\text{CO}_2} = f_{6\text{CO}_2} = -\frac{88}{56} f_{6\text{CO}}$$

$$q_7 = -\frac{d\rho_{\text{CH}_4}}{d\tau} = -\frac{16}{64} \frac{d\rho_{\text{O}_2}}{d\tau} = \frac{16}{36} \frac{d\rho_{\text{H}_2\text{O}}}{d\tau} = \frac{16}{44} \frac{d\rho_{\text{CO}_2}}{d\tau} =$$

					02.15.EC2321.KPM.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

$$= \frac{0.111 \cdot 10^{14}}{T} \rho_{CH_4} \rho_{O_2} \cdot e^{-15700/T} \text{ кг CH}_4 / \text{м}^3 \text{ с}$$

Отримаємо:

$$\frac{d\rho_{CH_4}}{d\tau} \frac{273}{T} \frac{T}{273} = -\frac{0,111 \cdot 10^{14}}{T} \frac{273}{T} \frac{273}{T} \frac{T}{273} \frac{T}{273} \rho_{CH_4} \rho_{O_2} e^{-15700/T}$$

$$\frac{d\rho_{CH_4}}{d\tau} = -4,066^{10} \rho_{CH_4} \rho_{O_2} e^{-15700/T} = f_{7CH_4}$$

$$\frac{d}{d\tau} \rho_{O_2} = f_{7O_2} = \frac{64}{16} f_{7CH_4}, \quad \frac{d}{d\tau} \rho_{CO_2} = f_{7CO_2} = -\frac{44}{16} f_{7CH_4}$$

$$\frac{d}{d\tau} \rho_{H_2O} = f_{7CO_2} = -\frac{36}{16} f_{7CH_4}$$

$$q_8 = -\frac{d\rho_{H_2}}{d\tau} = -\frac{4}{32} \frac{d\rho_{O_2}}{d\tau} - \frac{4}{36} \frac{d\rho_{H_2O}}{d\tau} = \frac{0.114 \cdot 10^{13}}{T^{1.5}} \cdot \rho_{H_2}^{1.5} \cdot \rho_{O_2} \cdot e^{-3430/T} \text{ кгH}_2 / \text{м}^3 \text{ с}$$

Отримаємо:

$$\frac{d\rho_{H_2}}{d\tau} \frac{273}{T} \frac{T}{273} = -\frac{0.114 \cdot 10^{13}}{T^{1.5}} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.5} \cdot \left(\frac{273}{T}\right)^{1.5} \frac{T}{273} \frac{273}{T} \cdot \rho_{H_2}^{1.5} \cdot \rho_{O_2} \cdot e^{-3430/T}$$

$$\frac{d\rho_{H_2}}{d\tau} = -2,527 \cdot 10^8 \cdot \rho_{H_2}^{1.5} \cdot \rho_{O_2} \cdot e^{-3430/T} = f_{8H_2}$$

$$\frac{d}{d\tau} \rho_{O_2} = f_{8O_2} = \frac{32}{4} f_{8H_2}, \quad \frac{d}{d\tau} \rho_{H_2O} = f_{8H_2O} = -\frac{36}{4} f_{8H_2}$$

					02.15.EC2321.KPM.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Таблиця 2.1 – 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	$C + 2H_2 = CH_4 + 79$	$\frac{d}{d\tau}\rho_{H_2} = -498,168 \cdot S \cdot \rho_{CH_4} e^{-13500/T_p} = f_{4H_2}$ $\frac{d}{d\tau}\rho_C = f_{4C} = \frac{12}{4} f_{4H_2}$ $\frac{d}{d\tau}\rho_{CH_4} = f_{4CH_4} = -\frac{16}{4} f_{4H_2}$

Закінчення таблиці 2.1

№ р-ції	Рівняння	Швидкість реакції
5	$C + H_2O = C + H_2 - 132$	$\frac{d}{d\tau} \rho_{H_2O} = -1260,073 \cdot S \cdot \rho_{H_2O} e^{-16000/T_p} = f_{5H_2O}$ $\frac{d}{d\tau} \rho_C = f_{5C} = \frac{12}{18} f_{5H_2O};$ $\frac{d}{d\tau} \rho_{CO} = f_{5CO} = -\frac{28}{18} f_{5H_2O};$ $\frac{d}{d\tau} \rho_{H_2} = f_{5H_2} = -\frac{2}{18} f_{5H_2O}$
гомогенні реакції		
6	$2CO + O_2 = 2CO_2 + 570$	$\frac{d}{d\tau} \rho_{CO} = -\frac{1,489 \cdot 10^{12}}{T_g^{0,75}} \rho_{CO} \rho_{O_2}^{0,25} \rho_{H_2O}^{0,5} e^{-16000/T_g} = f_{6CO}$ $\frac{d}{d\tau} \rho_{O_2} = f_{6O_2} = \frac{32}{56} f_{6CO}$ $\frac{d}{d\tau} \rho_{CO_2} = f_{6CO_2} = -\frac{88}{56} f_{6CO}$
7	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O + 800$	$\frac{d}{d\tau} \rho_{CH_4} = -4,066 \cdot 10^{10} \rho_{CH_4} \rho_{O_2} e^{-\frac{15700}{T_g}} = f_{7CH_4}$ $\frac{d}{d\tau} \rho_{O_2} = f_{7O_2} = \frac{64}{16} f_{7CH_4}$ $\frac{d}{d\tau} \rho_{CO_2} = f_{7CO_2} = -\frac{44}{16} f_{7CH_4}$ $\frac{d}{d\tau} \rho_{H_2O} = f_{7H_2O} = -\frac{36}{16} f_{7CH_4}$
8	$2H_2 + O_2 = 2H_2O + 484$	$\frac{d}{d\tau} \rho_{H_2} = -2,527 \cdot 10^8 \rho_{H_2}^{1,5} \cdot \rho_{O_2} e^{-3430/T_p} = f_{8H_2}$ $\frac{d}{d\tau} \rho_{O_2} = f_{8O_2} = \frac{32}{4} f_{8H_2}$ $\frac{d}{d\tau} \rho_{H_2O} = f_{8H_2O} = -\frac{36}{4} f_{8H_2}$

В табл.2.1 S - поверхня частинок, на якій відбувається реакція. В загальному випадку  $S=k\pi d^2n$  (n - число 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  $k=1,62\div 2,58$  [19].

### 2.3 Рівняння нерозривності, кількості руху, енергії для одномірного потоку

Підсумуємо (2.1) по i для всіх газоподібних складових. Враховуючи, що

$$f_{ij} = -f_{ji}, \quad \sum_i \rho_i U_i = \rho_g U_g \quad \text{отримаємо:}$$

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

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 табл. 1).

З рівняння (2.16), враховуючи, що швидкості складових газу дорівнюють швидкості газу ( $U_i=U_g$ ), а швидкість частинок вугілля  $U_p$  можна отримати рівняння для зміни густини складових суміші

для складових газу:

$$\frac{d}{dx}(\rho_i U_g) = \sum_j f_{ij}$$

$$\sum_j f_{ij} = \sum_j f_i^j = f_i$$

$$\rho_i \cdot \frac{dU_g}{dx} + U_g \cdot \frac{d\rho_i}{dx} = f_i$$

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{d\rho_i}{dx} = \frac{1}{U_g} \cdot \left( f_i - \rho_i \cdot \frac{dU_g}{dx} \right)$$

де -  $i$  – компонент суміші;

$j$  – номер реакції;

для частинок вугілля:

$$\frac{d}{dx}(\rho_p U_p) = \sum_j f_{ip}$$

$$\sum_j f_{ip} = \sum_j f_i^j = f_i$$

$$\rho_p \cdot \frac{dU_p}{dx} + U_p \cdot \frac{d\rho_p}{dx} = f_c$$

$$\frac{d\rho_p}{dx} = \frac{1}{U_p} \cdot \left( f_c - \rho_p \frac{dU_p}{dx} \right)$$

Значення  $f_i$  для кожної складової суміші:

$$f_{O_2} = f_{O_2}^1 + f_{O_2}^2 + f_{O_2}^6 + f_{O_2}^7 + f_{O_2}^8$$

$$f_{CO_2} = f_{CO_2}^2 + f_{CO_2}^3 + f_{CO_2}^6 + f_{CO_2}^7$$

$$f_{CO} = f_{CO}^1 + f_{CO}^3 + f_{CO}^5 + f_{CO}^6$$

$$f_{H_2O} = f_{H_2O}^5 + f_{H_2O}^7 + f_{H_2O}^8$$

$$f_{H_2} = f_{H_2}^4 + f_{H_2}^5 + f_{H_2}^8$$

					02.15.EC2321.KPM.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

$$f_{CH_4} = f_{CH_4}^4 + f_{CH_4}^7$$

$$f_{N_2} = 0$$

Остаточно отримаємо:

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

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

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

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

(2.17)

$$\frac{d}{dx} \rho_{H_2} = \frac{1}{U_g} \left( f_{H_2}^{4,5,8} - \rho_{H_2} \frac{d}{dx} U_g \right)$$

$$\frac{d}{dx} \rho_{CH_4} = \frac{1}{U_g} \left( f_{CH_4}^{4,7} - \rho_{CH_4} \frac{d}{dx} U_g \right)$$

$$\frac{d}{dx} \rho_{N_2} = -\frac{1}{U_g} \rho_{N_2} \frac{d}{dx} U_g$$

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

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	02.15.EC2321.KPM.2025-ПЗ	29

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 [17]

$\vec{I}_{ji} = \vec{R}_{ji} + f_{ji} \vec{U}_{ji}$ , 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 (3.17) по i для всіх газоподібних складових, отримаємо

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

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,  $W_i$  - швидкості руху газоподібних складових відносно середовища в цілому (дифузійні швидкості).

Оскільки  $W_i \approx 0$ ,  $U_i = U_g$ , то з (3.19) 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:

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

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

( $Re < 500$ );  $\mu_p$  - динамічна в'язкість газу.

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

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

$$N = \frac{6G_{p0} \cdot \Delta\tau}{\pi d_p^3 \rho_{p0}^0}$$

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

$$n = \frac{N}{\Delta V} = \frac{6G_{p0}}{\pi d_p^3 \rho_{p0}^0 F U_p} \quad (2.22)$$

Обмін імпульсом між частинками вугілля і газом визначаємо відповідно до схеми (рис. 2.1).

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

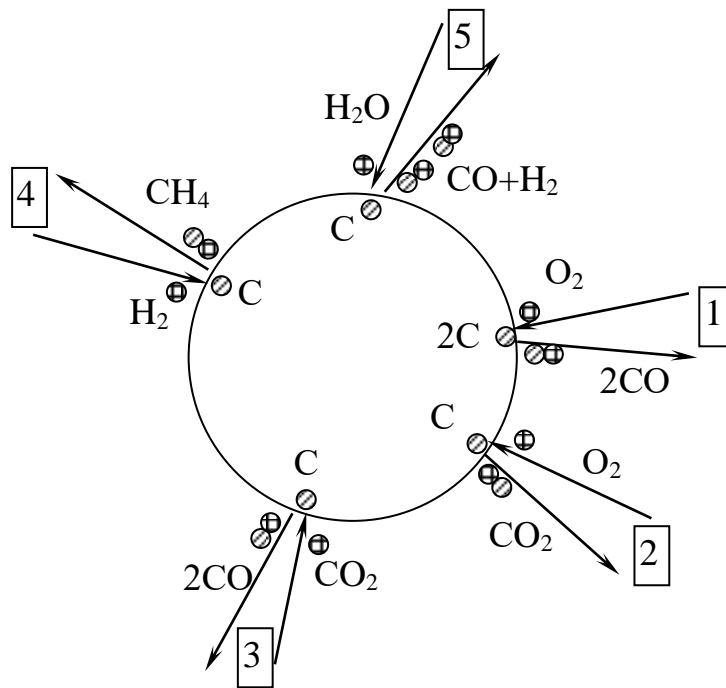


Рисунок 2.1 – Схема обміну імпульсу між частинками вугілля і газу

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

Тобто, вугільним частинкам 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  $f_p^g U_p^g = f_g^+ U_p + f_g^- U_g$  і враховуючи  $f_p^g = f_g^+ + f_g^-$  з (2.20) і (2.16), якщо просумувати просумувати всі складові газу:

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

де  $f_p^g \cdot U_p^g = (f_{CO}^{1,3,5} + f_{CO_2}^2 + f_{CH_4}^4 + f_{H_2}^5) \cdot U_{p+} + (f_{O_2}^{1,2} + f_{CO_2}^3 + f_{H_2}^4 + f_{H_2O}^5) \cdot U_g$ .

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

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

де  $f_p^g = f_{O_2}^{1,2} + f_{CO_2}^3 + f_{CO_2}^3 + f_{CO}^{1,3,5} + f_{H_2O}^5 + f_{H_2}^4 + f_{H_2}^5 + f_{CH_4}^4 = f_g^+ + f_g^-$

Тоді:

$$\rho_g \cdot U_g \cdot \frac{dU_g}{dx} + U_g \cdot f_g^+ + U_g \cdot f_g^- = -\frac{dP}{dx} + R_p^g + f_g^+ \cdot U_p + f_g^- \cdot U_g$$

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  $\vec{c}_i = \vec{\sigma}_i U_i = -P_i U_i$  без урахування роботи масових сил ( $\rho_i \vec{g}_i \cdot \vec{U}_i = 0$ ) і теплопровідності в газі ( $q_i = 0$ ) для одновимірного стаціонарного випадку прийме вигляд:

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

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

$$Q_{x,p}^g = q_{6-8} = q_6 + q_7 + q_8 = Q_6 \cdot \frac{1}{M_{CO}} \left( \frac{d\rho_{CO}}{d\tau} \right)_6 + Q_7 \cdot \frac{1}{M_{CH_4}} \left( \frac{d\rho_{CH_4}}{d\tau} \right)_7 +$$

$$Q_8 \cdot \frac{1}{M_{H_2}} \left( \frac{d\rho_{H_2}}{d\tau} \right)_8 =$$

$$= Q_6 \cdot \frac{1}{M_{CO}} |f_6^{CO}| + Q_7 \cdot \frac{1}{M_{CH_4}} |f_7^{CH_4}| + Q_8 \cdot \frac{1}{M_{H_2}} |f_8^{H_2}|$$

Підсумуємо (3.25) по і для всіх газоподібних складових. Ураховуючи, що  $U_i = U_T$  ( $W_i = 0$ ) і  $E_{ji} = -E_{ij}$  отримаємо:

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

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:

$$u_g = C_{vg} T_g = (C_{pg} - R) T_g = C_{pg} T_g - R T_g = C_{pg} T_g - \frac{P}{\rho_g} \quad (2.28)$$

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

Враховуючи (2.27) і залежність для питомої енергії газу, можна отримати (2.26) у вигляді:

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$e_g = u_g + \frac{U_g^2}{2} = C_{pg} \cdot T_g - \frac{P}{\rho_g} + \frac{U_g^2}{2}$$

$$\frac{d}{dx} \left( \rho_g \cdot U_g \left( C_{pg} \cdot T_g - \frac{P}{\rho_g} + \frac{U_g^2}{2} \right) \right) = -\frac{d}{dx} (P \cdot U_g) + E_p^g + \sum Q_{xp}^g$$

$$\frac{d}{dx} \left( \rho_g C_{pg} U_g T_g - U_g P + \frac{1}{2} \rho_g U_g^3 \right) = -\frac{d}{dx} (P U_g) + E_p^g + \sum Q_{xp}^g$$

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

або ураховуючи (3.16):

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

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

З рівняння стану:

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

де  $R_i$  - газові постійні складових газу.

Продиференціюємо (2.31):

$$\frac{dP}{dx} = \frac{dT_g}{dx} \sum \rho_i R_i + T_g \frac{d}{dx} \sum \rho_i R_i$$

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

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

$$\frac{d}{dx}(\rho_i U_g) = \sum_j f_{ji} \quad \text{ПОМНОЖИМО НА } R_i :$$

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

Просумуємо по  $i$ :

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

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

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

Тоді:

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

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

отримаємо:

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

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

Рівняння (3.30) 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:

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

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

Домножимо (\*) на  $\frac{T_g}{P} Cp_g \rho_g U_g$ :

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

Відніmemo з (2.33) вираз (\*\*):

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

$$P = \rho_g R T_g \Rightarrow R = \frac{P}{\rho_g T_g}$$

де  $R$  - газова стала для газу;

Остаточно отримаємо:

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

$$\frac{dT_g}{dx} = \frac{T_g}{P} \left[ R_p^g + f_g^+(U_p - U_g) - \frac{T_g}{U_g} \sum_i R_i f_i \right] -$$

$$- \frac{T_g}{P} \left[ \rho_g U_g - \frac{P}{U_g} \right] \frac{dU_g}{dx} \quad (2.35)$$

					02.15.EC2321.KPM.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

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

де 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) отримаємо рівняння для зміни швидкості системи частинок:

Враховуючи (2.9) запишемо:

$$\frac{d}{dx}(\rho_p U_p^2) = \sum_j (R_{jp} + f_{jp} U_{jp}) = \sum_j R_{jp} = R_g^p$$

$$\sum f_{jp} U_{jp} = |f_g^-| U_g - |f_g^+| U_p = -(f_g^- U_g + f_g^+ U_p)$$

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

$$\rho_p U_p \frac{dU_p}{dx} + U_p \frac{d(\rho_p U_p)}{dx} = R_g^p - (f_g^- U_g + f_g^+ U_p)$$

$$\rho_p U_p \frac{dU_p}{dx} + U_p f_c = R_g^p - (f_g^- U_g + f_g^+ U_p)$$

$$f_c^1 = -f_{O_2}^1 - f_{CO}^1, f_c^2 = -f_{O_2}^2 - f_{CO_2}^2, f_c^3 = -f_{CO_2}^3 - f_{CO}^3$$

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$f_C^4 = -f_{H_2}^4 - f_{CH_4}^4, f_C^5 = -f_{H_2O}^5 - f_{CO}^5 - f_{H_2}^5$$

$$f_C^{1,2,3,4,5} = -(f_{O_2}^{1,2} + f_{CO_2}^3 + f_{H_2}^4 + f_{H_2O}^5) - (f_{CO}^{1,3,5} + f_{CO_2}^2 + f_{CH_4}^4 + f_{H_2}^5) = -(f_g^- + f_g^+)$$

$$\rho_p U_p \frac{dU_p}{dx} = U_p f_g^- - f_g^+ U_p = R_p^g - f_g^- U_g - f_g^+ U_p$$

$$\rho_p U_p \frac{dU_p}{dx} = R_p^g - f_g^-(U_g - U_p)$$

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

Рівняння енергії для частинок вугілля має вигляд, аналогічний (3.27)

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

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.

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

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

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

отримаємо:

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



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

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

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).

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  $\alpha_p$  визначали залежно від числа Нуссельта використовуючи відому формулу Фреслінга:

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

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

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

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

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

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

Що входить в рівняння (2.39)  $E_p^g$  визначається аналогічно (3.40)

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

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

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

де  $T_s$  - температура стін реактора;  $\sigma$  - постійна Стефана-Больцмана,  $\varepsilon$  - ступінь чорноти частинок вугілля.

Для вирішення диференціальних рівнянь (2.17, 2.34, 2.35, 2.37, 2.39) використовували граничні умови.

В початковому перерізі (при  $x=0$ ) жарової труби 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:

$$T_g = T_{g0} \quad T_p = T_{p0}$$

## 2.4 Теплофізичні властивості складових газу

Теплофізичні властивості складових газу розраховували після апроксимації даних [20] методом найменших квадратів.

Для теплоємності кисню в інтервалі температур  $6,85 < t \leq 1026,85$  °С використовували залежність:

$$\begin{aligned} C_{pO_2} = & (2,21556405032613 \cdot 10^{-19} \cdot t^6 - 1,22310645213744 \cdot 10^{-15} \cdot t^5 + \\ & + 2,58678883568103 \cdot 10^{-12} \cdot t^4 - 2,61007084788497 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 + \\ & + 1,13606322450917 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0000947626529822891 \cdot t + \\ & + 0,916460403862343) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

при  $t > 1026,85$  °С використовували лінійну залежність

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$CpO_2=(10^{-4} \cdot t+1,022315) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Для CO<sub>2</sub> при 6,85 < t ≤ 1526,85 °С:

$$CpCO_2=(9,09123263170870 \cdot 10^{-20} \cdot t^6-3,33970532188987 \cdot 10^{-16} \cdot t^5+2,74764534367757 \cdot 10^{-13} \cdot t^4+4,16632562032579 \cdot 10^{-10} \cdot t^3-1,06102742515693 \cdot 10^{-6} \cdot t^2+1,08366652584219 \cdot 10^{-3} \cdot t+8,22378073029039 \cdot 10^{-1}) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

при t > 1526,85 °С:

$$CpCO_2=(10^{-4} \cdot t+1,20731499999985) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Для N<sub>2</sub> при 6,85 < t ≤ 1026,85 °С:

$$CpN_2=(-8,21135364388730 \cdot 10^{-19} \cdot t^6+2,73918867967406 \cdot 10^{-15} \cdot t^5-3,27128285503726 \cdot 10^{-12} \cdot t^4+1,39743809148159 \cdot 10^{-9} \cdot t^3+1,33539822175362 \cdot 10^{-7} \cdot t^2-3,37201119431888 \cdot 10^{-6} \cdot t+1,04101102287025) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

при t > 1026,85 °С:

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Эмн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

$$CpN_2=(1,5 \cdot 10^{-4} \cdot t + 1,0649725) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Для ССО при  $6,85 < t \leq 2726,85 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} CpCO = & (1,52706233685487 \cdot 10^{-20} \cdot t^6 - 1,46492953862369 \cdot 10^{-16} \cdot t^5 + \\ & + 5,48061161046780 \cdot 10^{-13} \cdot t^4 - 9,84750612952233 \cdot 10^{-10} \cdot t^3 + \\ & + 7,84434679461656 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 2,64621822388690 \cdot 10^{-5} \cdot t + \\ & + 1,04219085088952) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

при  $t > 2726,85 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

$$CpCO = (2 \cdot 10^{-5} \cdot t + 1,274462999999952) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Для  $\text{H}_2\text{O}$  при  $6,85 < t \leq 3126,85 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} CpH_2O = & (-7,22058941032493 \cdot 10^{-21} \cdot t^6 - 1,12645503281023 \cdot 10^{-16} \cdot t^5 + \\ & + 1,81936809609107 \cdot 10^{-12} \cdot t^4 - 4,90739729936933 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 + \\ & + 5,19479524758614 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 1,64189667466086 \cdot 10^{-3} \cdot t + \\ & + 2,14924894541390) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

при  $t > 3126,85 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

$$CpH_2O = (3,85 \cdot 10^{-2} \cdot t - 89,037249999997) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для  $H_2$  при  $6,85 < t \leq 3126,85$  °C:

$$C_p H_2 = (-1,85254079393265 \cdot 10^{-18} \cdot t^6 + 1,63019714125443 \cdot 10^{-14} \cdot t^5 - 4,86293560904514 \cdot 10^{-11} \cdot t^4 + 6,44575351703390 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 3,75025369830458 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 8,78500825041137 \cdot 10^{-3} \cdot t + 14,0345691943838) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

при  $t > 3126,85$  °C:

$$C_p H_2 = (0,173 \cdot t - 403,04505) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Для  $CH_4$  при  $6,85 < t \leq 726,85$  °C

$$C_p CH_4 = (7,47981265178661 \cdot 10^{-18} \cdot t^6 - 1,76803466543077 \cdot 10^{-14} \cdot t^5 + 1,62750901730517 \cdot 10^{-11} \cdot t^4 - 9,07533244129670 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 + 4,97961876131478 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 2,31577508385209 \cdot 10^{-3} \cdot t + 2,17530845947762) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

при  $t > 726,85$  °C:

$$C_p CH_4 = (4,59 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,7267585) \cdot 1000, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Теплоємність вугільних частинок визначали за формулою (3.34):

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_{\text{пуг}} = 0,992 + 0,000209 \cdot (T_{\text{p}} - 273,15).$$

Теплоємність газу (як суміші продуктів згоряє) визначали за формулою:

$$C_{\text{pг}} = (\rho_{\text{O}_2} \cdot C_{\text{pO}_2} + \rho_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{pCO}_2} + \rho_{\text{CO}} \cdot C_{\text{pCO}} + \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{pH}_2\text{O}} + \rho_{\text{H}_2} \cdot C_{\text{pH}_2} + \rho_{\text{CH}_4} \cdot C_{\text{pCH}_4} + \rho_{\text{N}_2} \cdot C_{\text{pN}_2}) / (\rho_{\text{O}_2} + \rho_{\text{CO}_2} + \rho_{\text{CO}} + \rho_{\text{H}_2\text{O}} + \rho_{\text{H}_2} + \rho_{\text{CH}_4} + \rho_{\text{N}_2})$$

## 2.5 Метод розрахунку

Розрахунки виконані методом Рунге-Кутта 4-го порядку точності.

Згідно з методом Рунге-Кутта значення  $y_i$ , які шукаються на відрізку  $(x_0, x^*)$  послідовно розраховуються за формулами:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} \cdot h \cdot (f_1 + 2 \cdot f_2 + 2 \cdot f_3 + f_4)$$

$$f_1 = f(x_i, y_i)$$

$$f_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2} \cdot h, y_i + \frac{1}{2} \cdot h \cdot f_1\right)$$

$$f_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2} \cdot h, y_i + \frac{1}{2} \cdot h \cdot f_2\right)$$

$$f_4 = f(x_i + h, y_i + f_3)$$

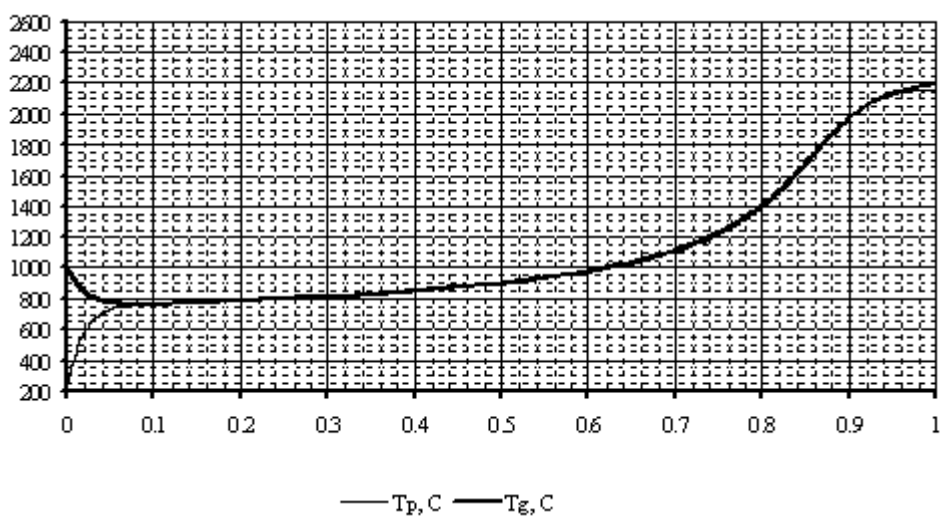
При розмірі сітки  $f_n$  і кроці  $h$  треба також ставити індекс сітки  $n$ , але для простоти запису цим нехтуємо.

Критерієм закінчення обчислень було або досягнення кінця жарової труби або зниження частки кисню в газі до  $10^{-3}$ .

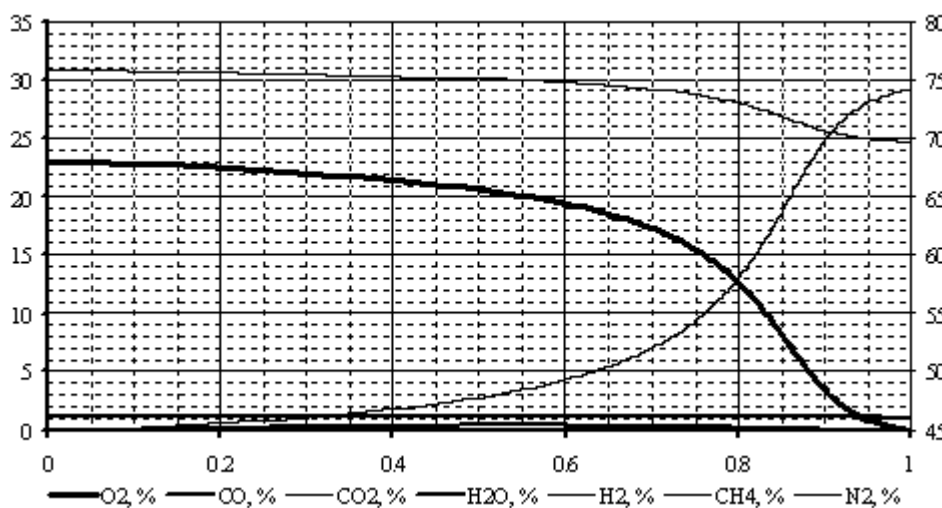
Обчислення велися за допомогою програмного пакету Delphi 7.

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

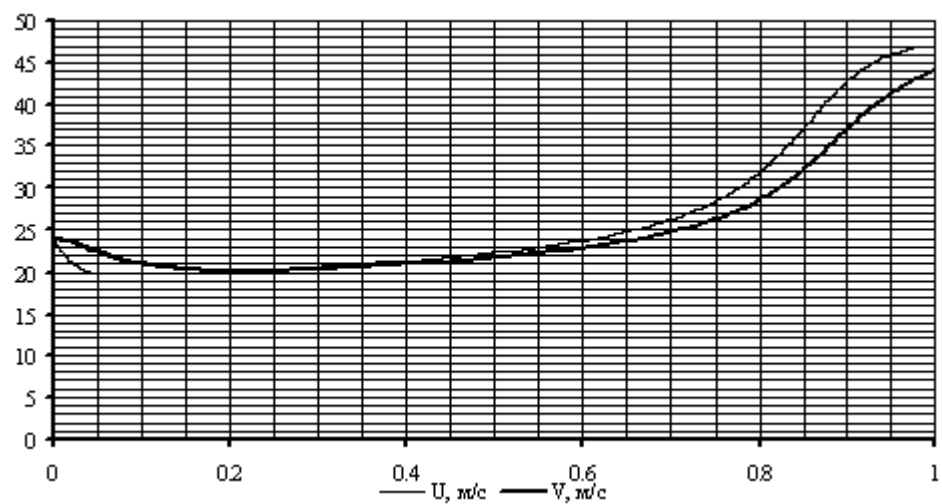
### 3 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ



а



б



в

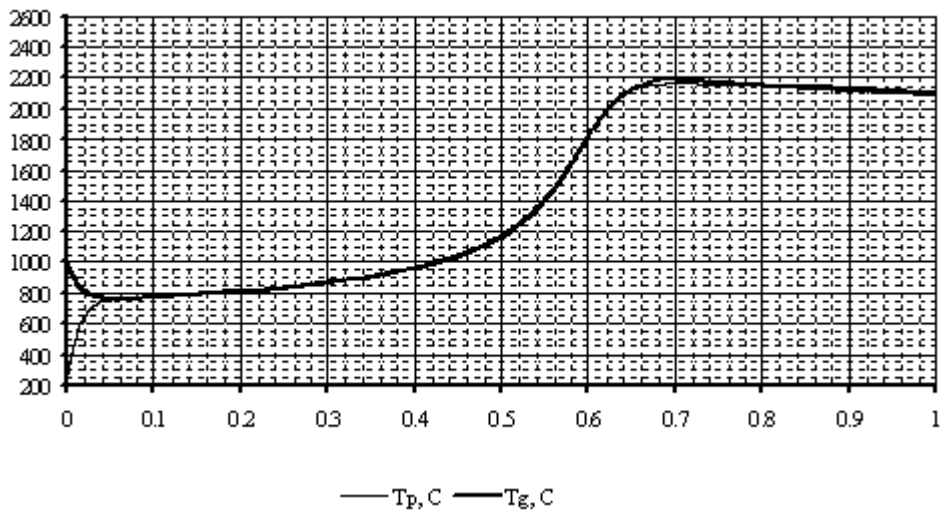
Рисунок 3.1 – Температури, концентрації та швидкості в залежності від координати при  $D=160$  мм;  $k=1,75$   $d=40$  мкм

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

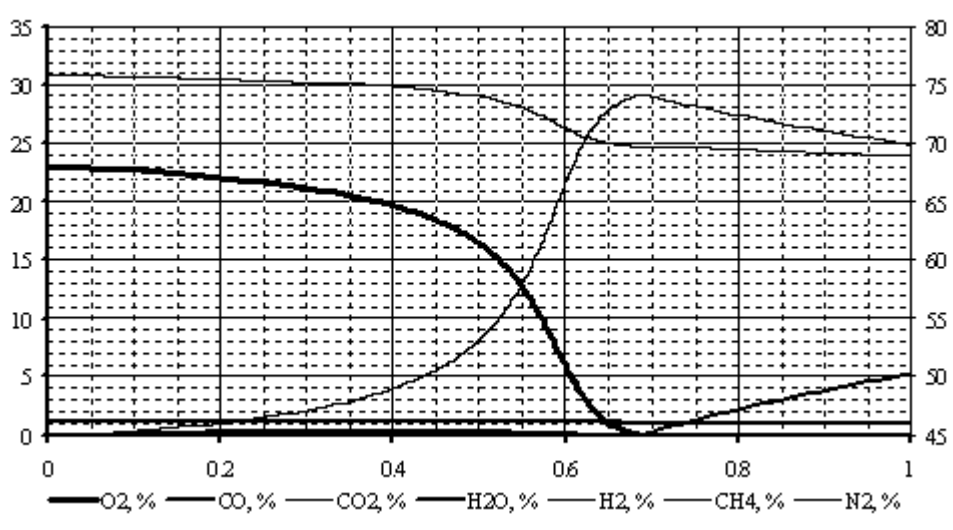




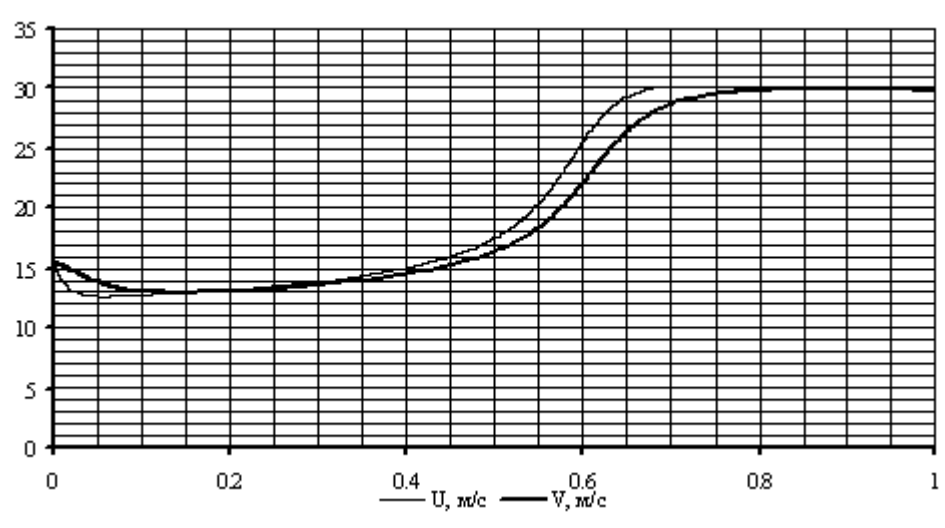




а

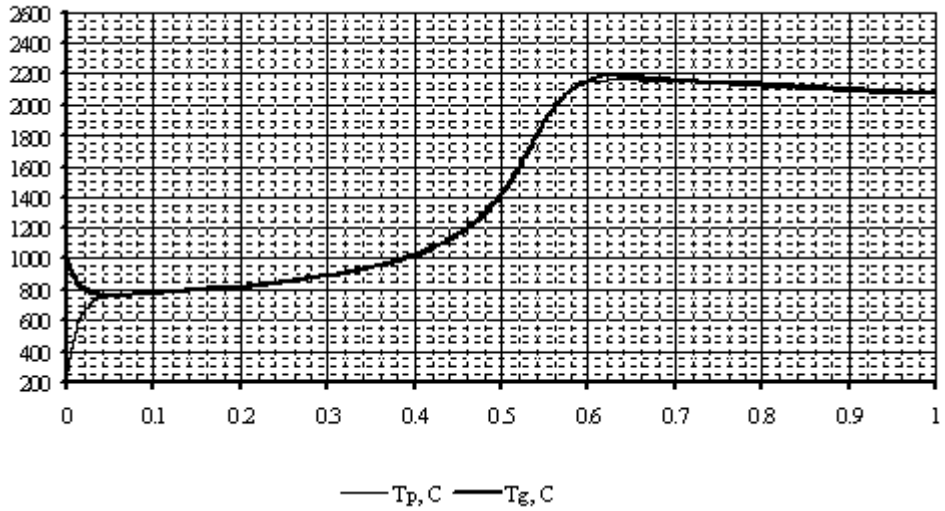


б

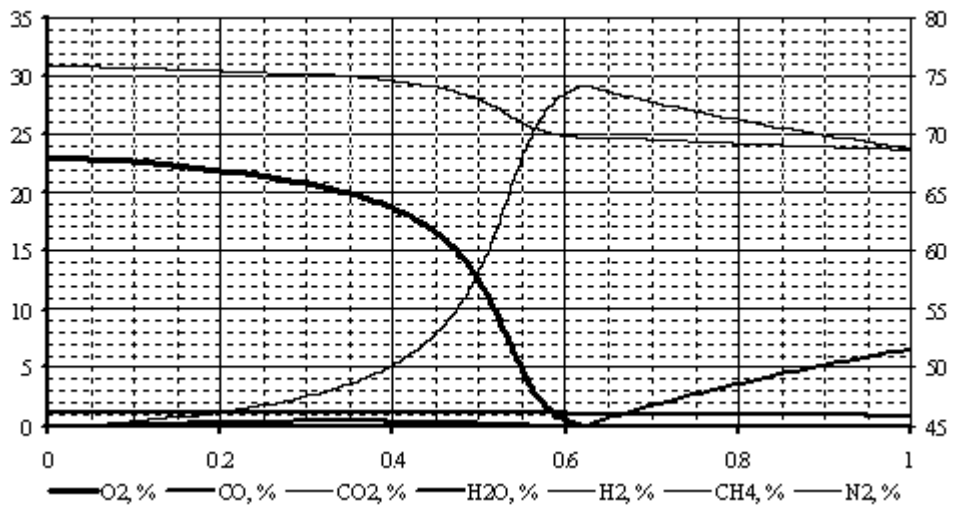


в

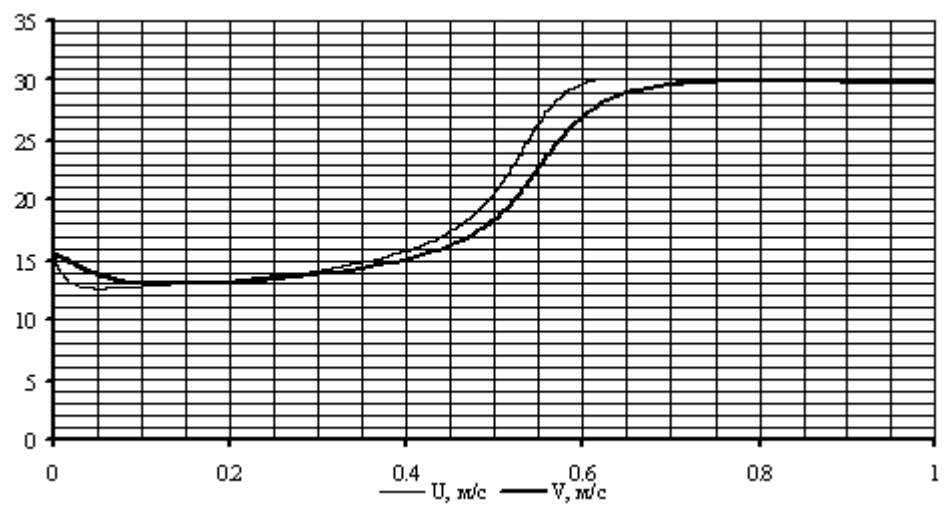
Рисунок. 3.5 – Температури, концентрації та швидкості в залежності від координати при  $D=200$  мм;  $k=1,62$   $d=40$  мкм



a

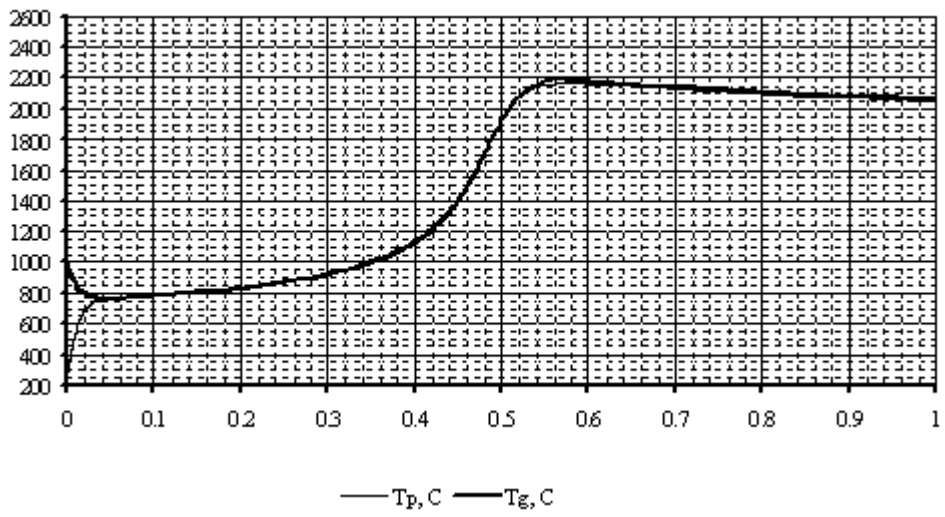


б

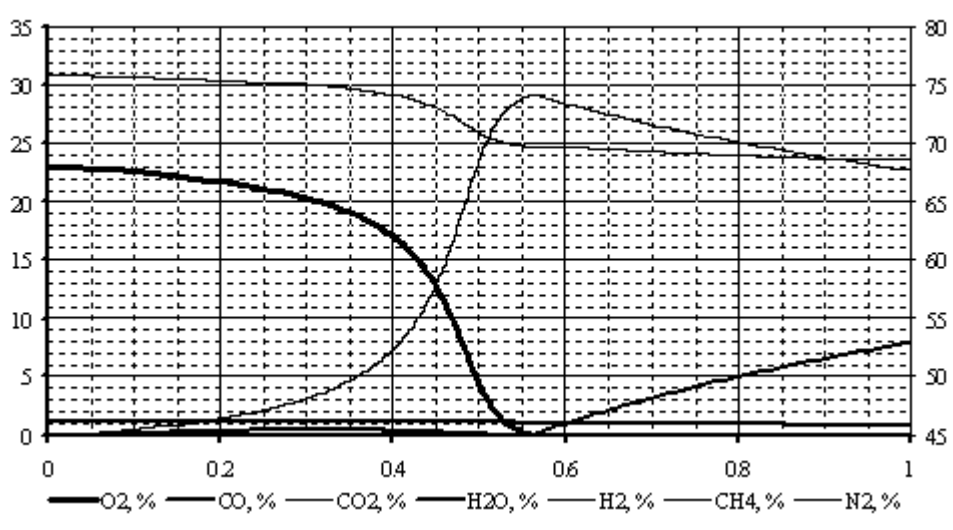


в

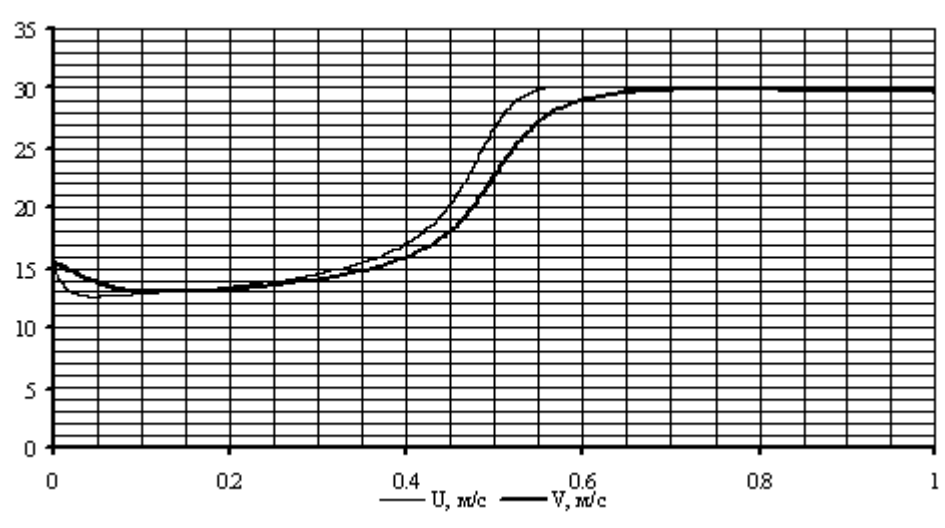
Рисунок 3.6 – Температури, концентрації та швидкості в залежності від координати при  $D=200$  мм;  $k=1,8$   $d=40$  мкм



а



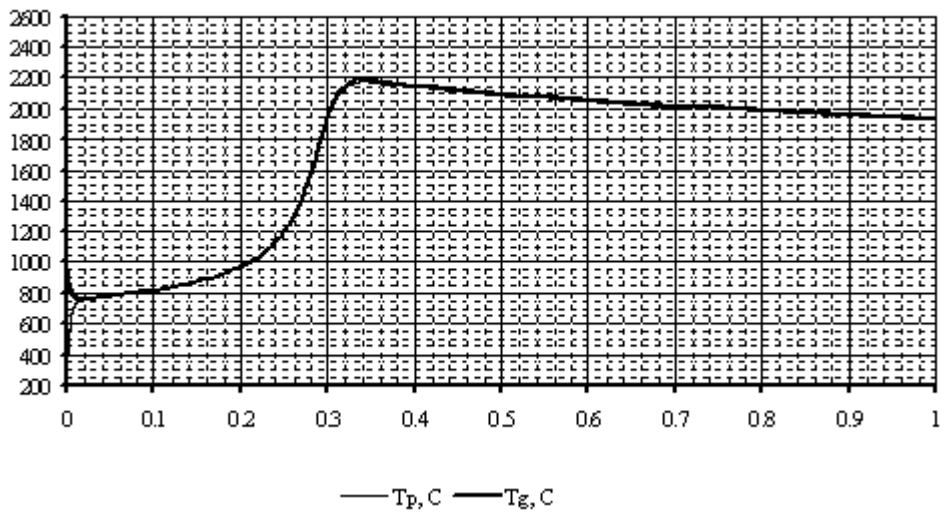
б



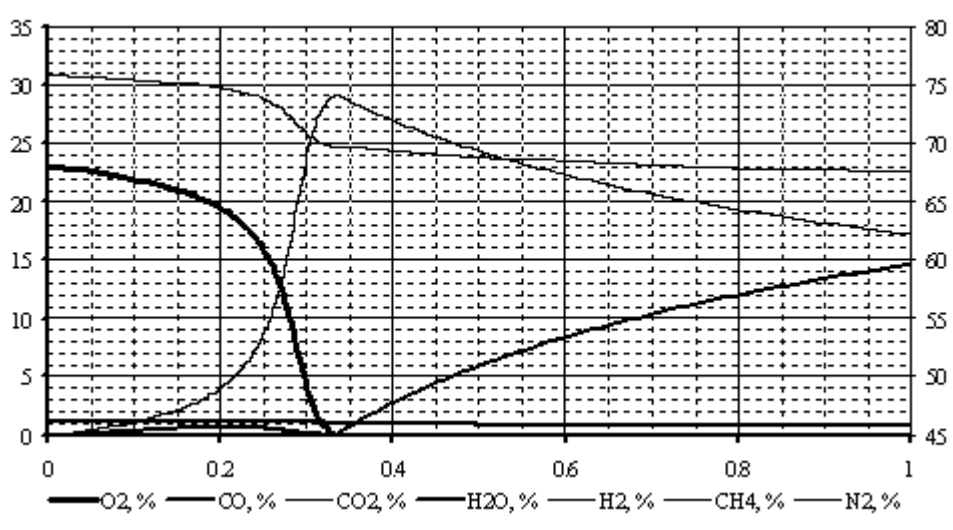
в

Рисунок 3.7 – Температури, концентрації та швидкості в залежності від координати при  $D=200$  мм;  $k=2.0$   $d=40$  мкм

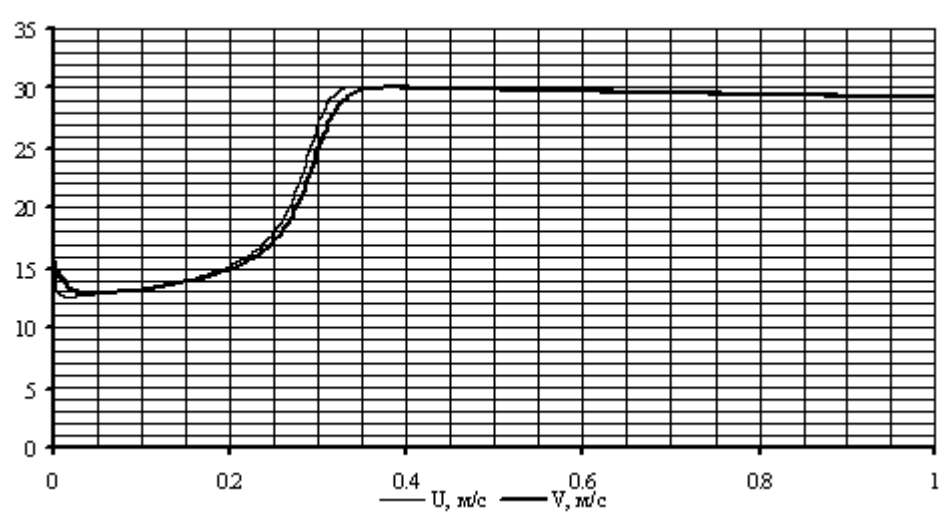




a



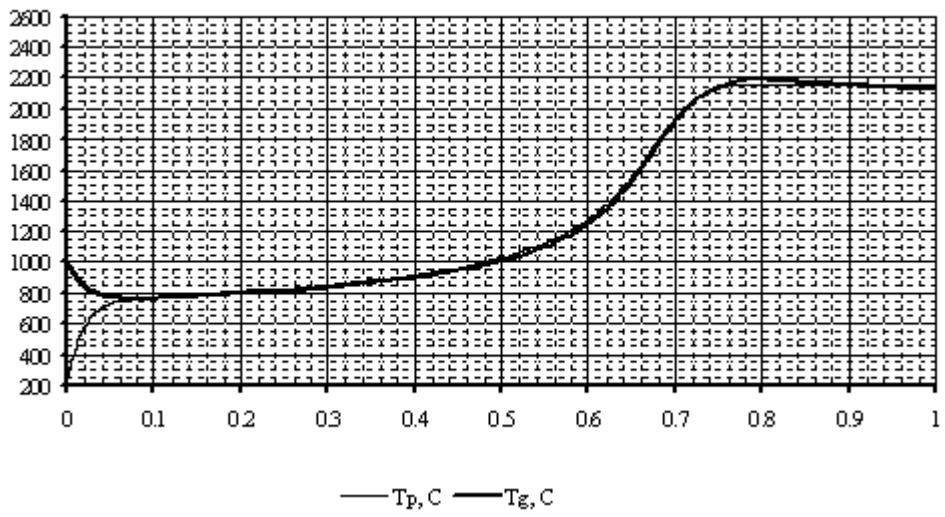
б



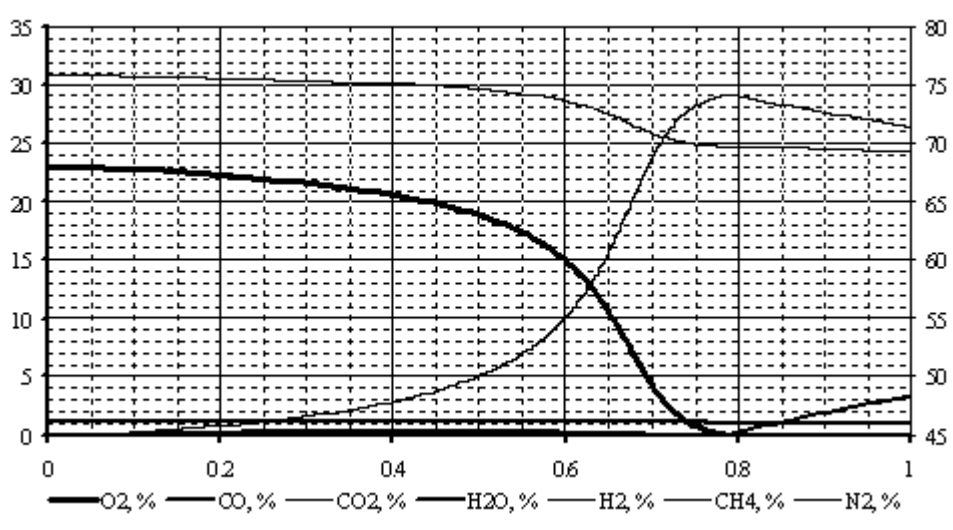
в

Рисунок 3.9 – Температури, концентрації та швидкості в залежності від координати при  $D=200$  мм;  $k=1,75$   $d=20$  мкм

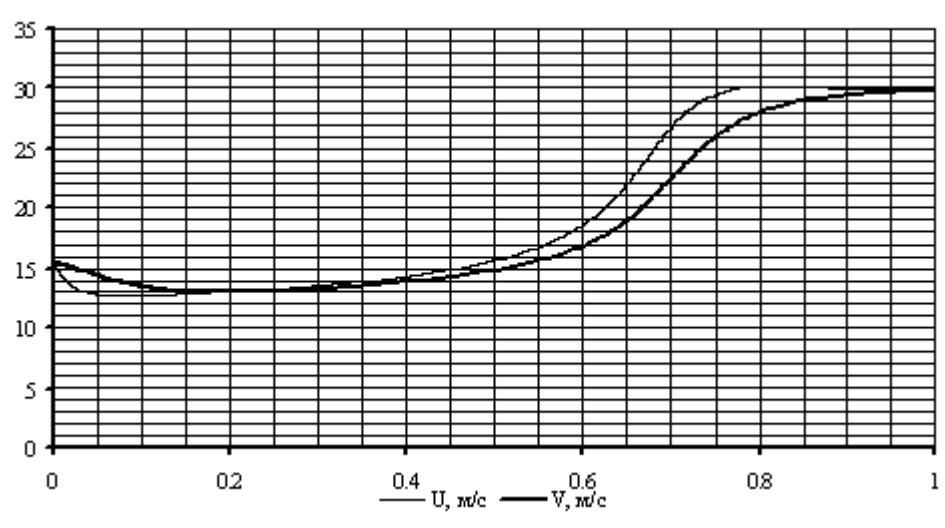




a



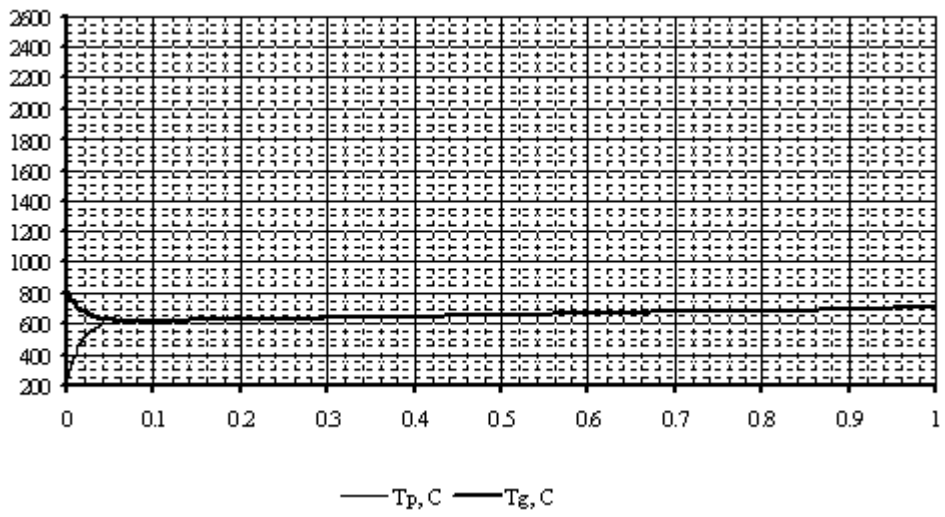
б



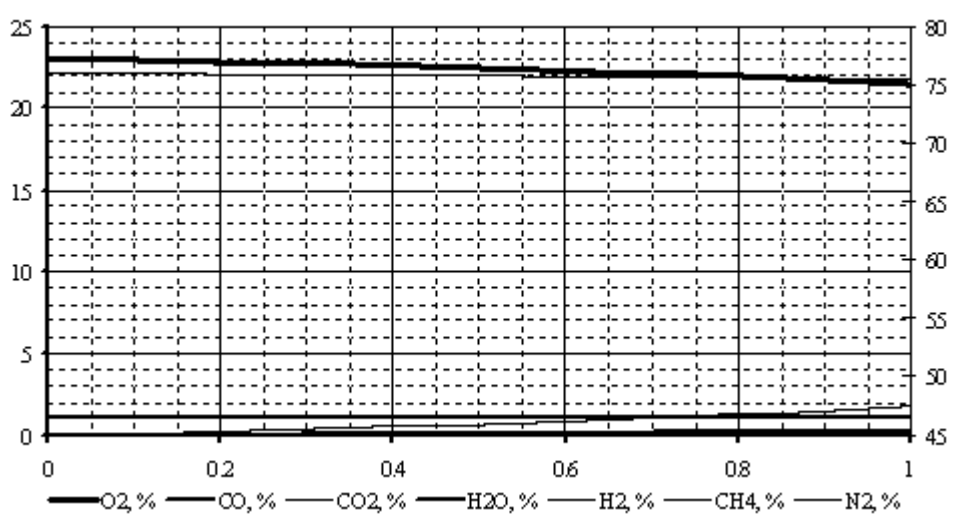
в

Рисунок 3.11 – Температури, концентрації та швидкості в залежності від координати при  $D=200$  мм;  $k=1,75$   $d=50$  мкм

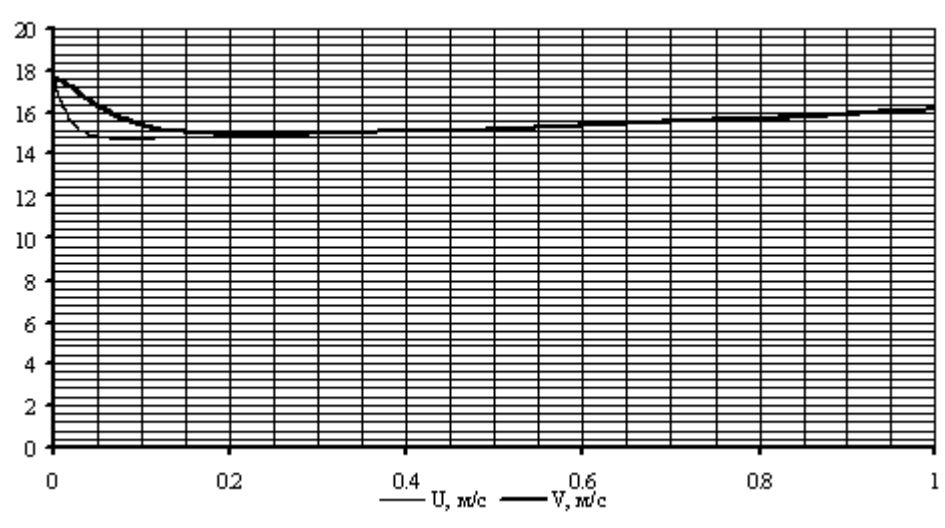




а



б



в

Рисунок 3.13 – Температури, концентрації та швидкості в залежності від координати при  $D=200$  мм;  $k=1,75$   $d=75$  мкм  $T_g=800$  ° C





Результати розрахунків отримали у вигляді графіків: залежності температури газу і частинок вугілля від довжини жарової труби, концентрації складових газу від довжини жарової труби, швидкостей руху частинок вугілля та газу.

Розрахунки за розробленою математичною моделлю (6, 23, 24, 26, 28) із відповідними граничними умовами виконані при густині частинок вугілля  $\rho_{0p}=1630 \text{ кг/м}^3$ , діаметрі частинок  $d_p=20, 30, 40, 50 \text{ і } 75 \text{ мкм}$ , діаметрі жарової труби  $D=0,16; 0,185; 0,2; 0,22; \text{ м}$ , максимальній довжині жарової труби  $x_k=1 \text{ м}$ , масовій частці золи в вугіллі  $A_r=30 \%$ , масова частка вуглецю в кутку  $C_r=1-A_r$ ,  $k= 1,62; 1,8; 2,0; 2,5$ , частці аеросуміші від всієї кількості на пальник, який йде в жарову трубу  $Q_{ж.т.}/Q_{г}=5 \%$ , витраті вугілля на пальник  $1,4 \text{ кг/с}$ , витраті повітря  $7520 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $2,5 \text{ кг/с}$ ), тиску газу  $P_0=101325 \text{ Па}$ , початковій температурі газу  $T_{g0}=1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , початковій температурі частинок вугілля  $T_{p0}=240 \text{ }^\circ\text{C}$ , початкова швидкість частинок приймалася  $U_p=0,99 \cdot U_g$ , масова частка повітря на вході в жарову трубу  $23 \%$ , азоту  $77 \%$ .

На рис. 3.1-3.4 а) наведено температури газу та частинок вугілля в залежності від координати та діаметра жарової труби  $D=0,16; 0,185; 0,2; 0,22; \text{ м}$ . Із графіків видно, що збільшення діаметру жарової труби призводить до перенесення зони максимуму температур в напрямку початкового перерізу. Так при  $D=0,16 \text{ м}$  максимум температур, розташований при  $x=1 \text{ м}$ , при збільшенні діаметру жарової труби до  $D=0,22 \text{ м}$  можна застосувати жарову трубу довжиною в 2 рази меншу і, як наслідок, зменшити габарити всієї установки. Це обумовлене зменшенням швидкості руху потоку (рис. 3.1-3.4 в) і, як наслідок, збільшення часу перебування частинок в жаровій трубі, коли вони запалюються. На виході із жарової труби швидкість потоку досягає  $48 \text{ м/с}$  при  $D=0,16 \text{ м}$  і  $25 \text{ м/с}$  при  $D=0,22 \text{ м}$ .

Максимальна температура частинок вугілля та продуктів згорання досягає приблизно  $2200 \text{ }^\circ\text{C}$  і не залежить від діаметру жарової труби для  $D=0,16 \div 0,22 \text{ м}$ .

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

При зменшенні діаметру жарової труби менше ніж  $D=0,16$  м зона інтенсивного горіння аеросуміші, якій відповідає максимум температур, виходить за межі жарової труби.

На рис 3.1-3.4 б) наведено концентрації складових газу в жаровій трубі. Зона повного вигорання кисню відповідає максимуму температури в жаровій трубі.

В зоні, де концентрація кисню  $CO_2=0$  кг/м<sup>3</sup> має місце накоплення СО тим більше, чим раніше був прореагований кисень. Збільшення концентрації СО обумовлене, насамперед, реакцією № 3 (таблиця 2.1), яка є ендотермічною, і цим обумовлено зменшення концентрації  $CO_2$  і зменшенням температури аеросуміші в зоні, де  $CO_2=0$ .

Було проведено чисельне дослідження впливу коефіцієнта форми частинок вугілля на інтенсивність згорання аеросуміші в жаровій труби (рис. 3.5-3.8). Для більш округлих частинок ( $k=1,62$ ), форма яких наближена до кулі, зона інтенсивного горіння наближується до кінця жарової труби і відповідає  $x=0,65$  м. Для більших  $k=2,5$  максимум температур при  $x=0,42$  м. Таким чином, для жарової труби із  $D=0,2$  м згорання аеросуміші відбувається всередині жарової труби незалежно від форми частинок, яка характерна для меленого вугілля. Для менших діаметрів жарової труби внаслідок більших швидкостей потоку має місце недостатній період часу для нормального горіння частинок.

На рис 3.9-3.12 наведено результати розрахунків при змінненні діаметру частинок вугілля від 20 мкм до 75 мкм.

На рис 3.9-3.12 3 а) спостерігається перенесення зони максимуму температур в напрямку, протилежному початковому перерізу. Так при  $dp= 20$  мкм максимум розташований при  $x=0,32$  м, а при  $dp= 75$  мкм максимум є при  $x=0,32$  м. Це призводить до збільшення габаритів всієї установки та збільшення вартості.

На рис. 3.9-3.12 б) також, як і в попередніх розрахунках можна побачити, що зона повного вигорання кисню є при максимумі температури в жаровій трубі.

На рис 3.9-3.12 в) видно, що швидкість потоку на виході із жарової труби складає приблизно 30 м/с. Чим більше значення діаметру частинок, тим менш стрімкіше є збільшення швидкості потоку і досягнення її максимуму.

Частинки вугілля більші ніж 75 мкм не встигають прогрітися до температури, коли відбувається інтенсивне горіння на довжині жарової труби  $x=1\text{м}$ .

Оскільки потік частинок є полідисперсним, а вміст частинок з діаметром більшим ніж 75 мкм становить приблизно 18 %, то в згоранні приймають участь 82 % аеросуміші. Це не призводить до значних втрат енергії, оскільки надлишок повітря  $\alpha \approx 0,2 \div 0,3$ .

На рис. 3.13-3.15 наведено результати розрахунків при зміні початкової температури повітря, що може бути реалізовано регулюванням кількості аеросуміші в жаровій трубі.

При  $T_{g0}=800\text{ }^\circ\text{C}$  , якій відповідає 6,788 % аеросуміші в жаровій трубі, має місце те, що частинки не загоряються.

При  $T_{g0}=900\text{ }^\circ\text{C}$  (5,759 %) процес згорання відбувається наприкінці жарової труби ( $x=1\text{м}$ ), причому максимум температур не досягається.

При  $T_{g0}=1200\text{ }^\circ\text{C}$  згорання відбувається на відстані приблизно  $x=0,25\text{ м}$  , але кількість аеросуміші, яка поступає в жарову трубу незначна (3,96 %).

Для оцінки достовірності результатів була розрахована температура згорання в жаровій трубі відповідно до теплового балансу для наступних вихідних даних. Вугілля, яке має склад, %

$$C^P = 68,97; N^P = 0,65; H^P = 1,30; S^P = 1,84; O_2 = 1,41; A^P = 24,83; W^P = 1$$

Витрата повітря на весь палик  $Q_{II} = 7520 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ , витрата вугілля  $G_g = 1,4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ,

температура аеросуміші на вході в реактор  $t_{II0} = 240\text{ }^\circ\text{C}$ , доля аеросуміші що

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

потрапляє в реактор  $\beta = 0,05$ . Потужність плазмотрону  $N_n = 150$  кВт, коефіцієнт корисної дії  $\eta = 0,70$ .

1. Визначимо питому теплоту згорання вугілля за формулою Менделєєва:

$$Q_n^p = (339 \cdot C^p + 1030 \cdot H^p - 109(O^p - S^p) - 25,1 \cdot W^p) \cdot 1000 = \\ = (339 \cdot 68,97 + 1030 \cdot 1,3 - 109(1,41 - 1,84) - 25,1 \cdot 1) \cdot 1000 = 24741600$$

2. Теоретично необхідна кількість повітря для спалювання:

$$V_0 = 0,089 \cdot C^p + 0,267 \cdot H^p + 0,033(S - O) = \\ = 0,089 \cdot 68,97 + 0,267 \cdot 1,3 + 0,033(1,84 - 1,41) = 6,5 \text{ м}^3/\text{кг}$$

3. Витрата повітря в жаровій трубі:

$$Q = Q_n \cdot \beta = 7520 \cdot 0,05 = 376 \text{ м}^3 / \text{год}$$

4. Витрата вугілля в жаровій трубі:

$$G = G_g \cdot \beta = 1,4 \cdot 0,05 = 0,07 \text{ кг/с}$$

5. Витрата повітря, яке відповідає теоретично необхідній:

$$Q_{п0} = G \cdot V_0 = 0,07 \cdot 6,5 = 0,455 \text{ м}^3/\text{с} \text{ (1637,9 м}^3/\text{год)}$$

6. Відношення реальної витрати повітря до теоретично необхідної (надлишок повітря)

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\alpha = \frac{Q}{Q_{\Pi_0}} = \frac{376}{1637,9} = 0,23$$

7. Кількість вугілля, яке теоретично може згоріти в жаровій трубі:

$$G_{e_0} = \alpha \cdot G = 0,23 \cdot 0,07 = 0,0161 \text{ кг/с}$$

8. Кількість теплоти в одиницю часу (потужність), яка виділяється при згоранні вугілля в жаровій трубі:

$$Q_{\Gamma} = G_{e_0} \cdot Q_n^p = 0,0161 \cdot 24741600 = 397580 \text{ Вт}$$

9. Об'єм продуктів згорання, що утворюється при згоранні, при теоретично необхідній витраті повітря:

$$V_{CO_2} = 0,0187 \cdot C^p = 0,0187 \cdot 68,97 = 1,2897 \text{ м}^3/\text{кк}$$

$$V_{SO_2} = 0,007 \cdot S^p = 0,007 \cdot 1,84 = 0,01288 \text{ м}^3/\text{кк}$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_0 + 0,008 \cdot N^p = 0,79 \cdot 6,5 + 0,008 \cdot 0,65 = 5,14 \text{ м}^3/\text{кк}$$

10. Оскільки середні теплоємності продуктів спалювання та вугілля залежать від температури згорання розрахунок повинен бути ітераційним.

Приймаємо температуру згорання  $t'_{32} = 2112 \text{ }^\circ\text{C}$ , тоді теплоємності

$$C_{RO_2} = 2437,7 \text{ Дж}/(\text{м}^3\text{К}), C_{N_2} = 1490,3 \text{ Дж}/(\text{м}^3\text{К}), C_{H_2O} = 1984,4 \text{ Дж}/(\text{м}^3\text{К})$$

При  $t_{\Pi_0} = 240 \text{ }^\circ\text{C}$  теплоємність повітря  $C_{\Pi} = 1334,8 \text{ Дж}/(\text{м}^3\text{К})$ , тоді теплота, що надходить із повітрям до жарової труби

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{II} = C_{II} \cdot \frac{Q}{3600} \cdot t_{II_0} = 1334,8 \cdot \frac{376}{3600} \cdot 240 = 33460 \text{ Вт};$$

Теплоємність вугілля:

$$C_g = 992 + 0,209 \cdot t_{II_0} = 992 + 0,209 \cdot 240 = 1042,2 \text{ Дж/(кгК)}$$

і теплота, що надходить із вугіллям

$$I_g = C_g \cdot G \cdot t_{II_0} = 1042,2 \cdot 0,07 \cdot 240 = 17508,3 \text{ Вт}$$

11. Витрата CO<sub>2</sub> в продуктах згорання:

$$Q_{CO_2} = V_{CO_2} \cdot G_{g_0} = 1,2897 \cdot 0,0161 = 0,0207, \text{ м}^3/\text{с}$$

$$Q_{SO_2} = V_{SO_2} \cdot G_{g_0} = 0,01288 \cdot 0,0161 = 0,000207, \text{ м}^3/\text{с}$$

$$Q_{N_2} = V_{N_2} \cdot G_{g_0} = 5,1399 \cdot 0,0161 = 0,0826, \text{ м}^3/\text{с}$$

$$Q_{H_2O} = V_{H_2O} \cdot G_{g_0} = 0,1580 \cdot 0,0161 = 0,0025, \text{ м}^3/\text{с}$$

12. Витрата продуктів згорання:

$$Q_{32} = \Sigma Q_i = 0,0207 + 0,000207 + 0,0826 + 0,0025 = 0,1061 \text{ м}^3/\text{с}$$

13. Об'ємна доля складових газу в продуктах згорання:

$$v_{CO_2} = \frac{Q_{CO_2}}{Q_{32}} = \frac{0,0207}{0,1061} = 0,195$$

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

$$v_{SO_2} = \frac{Q_{SO_2}}{Q_{32}} = \frac{0,000207}{0,1061} = 0,002$$

$$v_{N_2} = \frac{Q_{N_2}}{Q_{32}} = \frac{0,0826}{0,1061} = 0,779$$

$$v_{H_2O} = \frac{Q_{H_2O}}{Q_{32}} = \frac{0,0025}{0,1061} = 0,024$$

14. Густина продуктів згорання:

$$\rho_{32} = \sum \rho_i \cdot v_i,$$

де  $\rho_i$  – густина складових газу при н. у .

$$\text{Оскільки } \rho_{CO_2} = 1,964 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_{SO_2} = 2,858 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_{N_2} = 1,257 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{O_2} = 1,418 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_{H_2O} = 0,803 \text{ кг/м}^3;$$

$$\text{то } \rho_{32} = 1,964 \cdot 0,195 + 2,858 \cdot 0,002 + 1,257 \cdot 0,779 + 0,803 \cdot 0,024 = 1,387 \text{ кг/м}^3$$

15. Визначимо суму добутків витрати складової газу на відповідну питому теплоємність:

$$\sum C_i Q_i = 2437,7(0,0207 + 0,000207) + 1490,3 \cdot 0,0826 + 1984,4 \cdot 0,0025 = 179,16 \text{ Вт/К}$$

16. Теплоємність вугілля при  $t_{32} = 2112 \text{ }^\circ\text{C}$

$$C_{H_3} = 992 + 0,209 \cdot t_{32} = 992 + 0,209 \cdot 2112 = 1433,4 \text{ Дж/(кгК)}$$

17. Визначимо масу вугілля на вході із жарової труби.

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17.1. Витрата  $H^p$  на вході в жарову трубу

$$G_H = \frac{H^p}{100} \cdot G = \frac{1,3}{100} \cdot 0,07 = 0,00091, \text{ кг/с}$$

Аналогічно

$$G_S = \frac{S^p}{100} \cdot G = \frac{1,84}{100} \cdot 0,07 = 0,00129 \text{ кг/с}$$

$$G_N = \frac{N^p}{100} \cdot G = \frac{0,65}{100} \cdot 0,07 = 0,000455 \text{ кг/с}$$

$$G_O = \frac{O^p}{100} \cdot G = \frac{1,41}{100} \cdot 0,07 = 0,000987 \text{ кг/с}$$

$$G_W = \frac{W^p}{100} \cdot G = \frac{1}{100} \cdot 0,07 = 0,0007 \text{ кг/с}$$

$$G_C = \frac{C^p}{100} \cdot G = \frac{68,97}{100} \cdot 0,07 = 0,0483 \text{ кг/с}$$

$$G_A = \frac{A^p}{100} \cdot G = \frac{24,83}{100} \cdot 0,07 = 0,0174, \text{ кг/с}$$

17.2 Зміна масової витрати внаслідок згорання I ступені жарової труби:

$$\Delta G_H = \frac{H^p}{100} \cdot G_{\text{го}} = \frac{1,3}{100} \cdot 0,0161 = 0,000209 \text{ кг/с}$$

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

$$\Delta G_S = \frac{S^P}{100} \cdot G_{\epsilon_0} = \frac{1,84}{100} \cdot 0,0161 = 0,000296 \text{ кг/с}$$

$$\Delta G_N = \frac{N^P}{100} \cdot G_{\epsilon_0} = \frac{0,65}{100} \cdot 0,0161 = 0,000104 \text{ кг/с}$$

$$\Delta G_O = \frac{O^P}{100} \cdot G_{\epsilon_0} = \frac{1,41}{100} \cdot 0,0161 = 0,000227 \text{ кг/с}$$

$$\Delta G_W = \frac{W^P}{100} \cdot G_{\epsilon_0} = \frac{1}{100} \cdot 0,0161 = 0,000161 \text{ кг/с}$$

$$\Delta G_C = \frac{C^P}{100} \cdot G_{\epsilon_0} = \frac{68,97}{100} \cdot 0,0161 = 0,0111 \text{ кг/с}$$

### 17.3 Витрата складових вугілля на виході із жарової труби

$$G_{H_{\text{ввн}}} = G_H - \Delta G_H = 0,00091 - 0,000209 = 0,000701 \text{ кг/с}$$

$$G_{S_{\text{ввн}}} = G_S - \Delta G_S = 0,00129 - 0,000296 = 0,000992 \text{ кг/с}$$

$$G_{N_{\text{ввн}}} = G_N - \Delta G_N = 0,000455 - 0,000104 = 0,000351 \text{ кг/с}$$

$$G_{O_{\text{ввн}}} = G_O - \Delta G_O = 0,00987 - 0,000227 = 0,000760 \text{ кг/с}$$

$$G_{W_{\text{ввн}}} = G_W - \Delta G_W = 0,0007 - 0,000161 = 0,000539 \text{ кг/с}$$

$$G_{C_{\text{ввн}}} = G_C - \Delta G_C = 0,0483 - 0,0111 = 0,0372 \text{ кг/с}$$

$$G_{A_{\text{ввн}}} = G_A = 0,0174 \text{ кг/с}$$

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17.4 Витрата вугілля на виході із жарової труби після згорання:

$$G_{нз} = G - \Delta G_H - \Delta G_S - \Delta G_N - \Delta G_O - \Delta G_W - \Delta G_C = 0,07 - 0,000209 - 0,000296 - 0,000104 - 0,000227 - 0,000161 - 0,0111 = 0,0579 \text{ кг/с}$$

18. Температура згорання в жаровій трубі

$$t_{32} = \frac{(C_6 \cdot G + C_{II} Q) \cdot t_{II0} + N\eta + G_{60} \cdot Q_H^p}{\sum C_i \cdot Q_i + C_{нз} G_{нз}} = \frac{17508,3 + 33460 + 150000 \cdot 0,7 + 397580}{179,6 + 1433,4 \cdot 0,0579} = 2111,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

19. Відносна похибка

$$\varepsilon = \frac{|t_{32} - t'_{32}|}{t_{32}} \cdot 100 = \frac{|2111,3 - 2112|}{2111,3} \cdot 100 = 0,03 \%$$

Оскільки похибка незначна, подальше уточнення температури не потрібне.

Відносне відхилення балансової температури від розрахованої запропонованою методикою складає

$$\eta = \frac{|t_{32} - t|}{t_{32}} \cdot 100 = \frac{|2111,3 - 2199|}{2111,3} \cdot 100 = 4,1 \%$$

Це пов'язане різницею у розрахунках теплоти згорання та відмінністю початкових умов.

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В результаті проведення даної роботи були отримані конструктивні розміри жарової труби ( $D=0,2$  м  $x=0,8\div 1$  м), розроблено оптимальні режими роботи всієї установки.

Загалом експерименти на практиці довели працездатність теоретичних викладок. Були отримані такі показники горіння пилоповітряної суміші, що забезпечують нормальну роботу котла.

Технологія ТППП дозволяє знизити (а в деяких випадках відмовитись) використання природного газу та мазуту для розпалу та стабілізації горіння.

Дана технологія застосовувалася на Придніпровській ТЕС на котлах №17 та №19 (ТП 210). Взагалі, ця технологія є універсальною для всіх видів палив та котлів. Особливо, вона необхідна для спалювання низько реакційного вугілля, якого на Україні є вдосталь.

Після проведення різних розрахунків зі зміною діаметру жарової труби, частинок вугілля та коефіцієнту форми було визначено зони прогріву частинок вугілля та інтенсивного згорання. При досягненні температури частинок  $T_p=1000\div 1200$  °С починається їх інтенсивне згорання, яке закінчується на відстані  $x=0,1\div 0,15$  м.

Проведення керованої реакції ТППП сприяє ефективному запалюванню й спалюванню вугілля марки АШ. Розроблена технологія дозволяє зменшити механічний недопал вугілля, збільшити ККД котла, зменшити використання природного газу і мазуту.

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Small Combustion Installations: Techniques, Emissions and Measures for its Reduction URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC42208> (дата звернення: 06.11.2024).
2. Oil Depletion and the Energy Efficiency of Oil Production: The Case of California URL: [https://www.mdpi.com/2071-1050/3/10/1833?utm\\_source](https://www.mdpi.com/2071-1050/3/10/1833?utm_source) (дата звернення: 01.11.2024).
3. Challenges and Issues of Modern Science URL: [https://figshare.com/authors/Challenges\\_and\\_Issues\\_of\\_Modern\\_Science\\_/15463499](https://figshare.com/authors/Challenges_and_Issues_of_Modern_Science_/15463499) (дата звернення: 03.11.2024).
4. Gil A.V., Starchenko A.V. Mathematical modelling of physical and chemical processes of coal combustion in chamber furnaces of boiler aggregates based on the package of applied programs FIRE 3D. *Thermophys. Aeromech.* 2012. №19. P. 503–519.
5. Advanced combustion system for cracking furnaces URL: [https://www.digitalrefining.com/article/1001038/advanced-combustion-system-for-cracking-furnaces?utm\\_source](https://www.digitalrefining.com/article/1001038/advanced-combustion-system-for-cracking-furnaces?utm_source) (дата звернення: 10.11.2024).
6. Chemical Kinetics Unit 14 – Computational Methods in Chemical Kinetics URL: <https://library.fiveable.me/chemical-kinetics/unit-14> (дата звернення: 15.11.2024).
7. Pilot-Scale Experiences on a Plasma Ignition System for Pulverized Fuels URL: <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v14y2021i16p4726-d608138.html> (дата звернення: 16.11.2024).
8. Moustakas K.; Fattah D.; Malamidis S.; Haralambous K. Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment *Journal of Hazardous Materials.* 2005. 123(1–3). P. 120–126.
9. Handbook of Biofuels Production. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081004555/handbook-of-biofuels-production> (дата звернення: 16.11.2024).

					02.15.EC2321.KPM.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

10. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials. New York: John Wiley & Sons, 2005. 800 p.
11. Zhang Y., Liu Y., Wang X., Stabilization of Pulverized Coal Combustion by Plasma Assist. *Energy*. 2017. №141. P. 1–10.
12. Zhang Y., Liu Y., Wang X., Plasma Ignition System for Pulverized Coal Boilers. *Energy*. 2016. №115. P. 1–10.
13. Plasma Technology for Enhancement of Pulverized Coal Ignition and Combustion. URL: <https://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc20/176.pdf> (дата звернення: 17.11.2024).
14. Loitsyanskii L. G. Mechanics of Liquids and Gases. Amsterdam: Elsevier, 2014. 816 p.
15. Zaporozhets A.O., Babak V.P. Control of fuel combustion in small and medium power boilers. Kyiv: Akadempriodyka, 2020. 128 p.
16. Chemical Kinetics in Combustion and Reactive Flows. URL <https://www.cambridge.org/core/books/chemical-kinetics-in-combustion-and-reactive-flows/DC697B3DAFA0C5BBC5F34BA75B46AC4F> (дата звернення: 29.11.2024).
17. Fundamentals of the mechanics of heterogeneous media. URL : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1978MoIzN...R...N> (дата звернення: 03.12.2024).
18. Коваль В.П., Жигул В.А. Введення в аерогідромеханіку багатофазних середовищ: Навч. посібник для спец. курсу „Гідромеханіка багатофазних середовищ”. Дніпропетровськ, 1975. 90 с.
19. Tables on the thermophysical properties of liquids and gases : in normal and dissociated states. URL : <https://archive.org/details/tablesonthermoph0000varg> (дата звернення: 05.12.2024).
20. Combustion of aerosol particles in an electromagnetic field URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00783041> (дата звернення: 06.12.2024).

					02.15.ЕС2321.КРМ.2025-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76