

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ФІЗИКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

А. А. Халатов

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 6.040204 Прикладна фізика

(код і назва)

на тему: **Вплив розміру вугільних частинок на процес їх горіння у метаноповітряній суміші**

Виконав: студент 4 курсу, групи ФФ-52

Полванов Богдан Мирославович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доцент, к.ф.-м.н. Пономаренко С. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант 2, 3 п.н.с., к.т.н. Кобзар С. Г.

(номер розділу)

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент ас., к.ф.-м.н. Димитрієва Н. Ф.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент

(підпис)

Національний Технічний Університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Фізико-технічний інститут
Кафедра фізики енергетичних систем

Рівень вищої освіти — перший (бакалаврський)
Спеціальність 6.040204 Прикладна фізика

«ЗАТВЕРДЖЕНО»

Завідувач кафедри

_____ Халатов. А. А. _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ
на бакалаврську роботу студенту

_____ Полванову Богдану Мирославовичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

1. Тема роботи: Вплив розміру вугільних частинок на процес їх горіння у метаноповітряній суміші,
науковий керівник роботи _____ доцент, к.ф.-м.н. Пономаренко С. М. _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 27 » травня 2019 р № 1414-с

2. Термін подання студентом роботи « 05 » червня 2019 р.

3. Об'єкт дослідження: Процеси теплообміну, кінетика горіння, яка впливає на процес енерговиділення в камері згоряння при подачі палива та повітря.

4. Предмет дослідження: Фактори які впливають на процес утворення вугільного недопалу та оксидів вуглецю при подачі палива та повітря у камеру згоряння.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Для циліндричної модельної камери згоряння змодельювати процес горіння вугільного палива; Провести моделювання за допомогою програмного комплексу ANSYS Fluent; Знайти оптимальні розміри вугільних частинок; Знайти оптимальну емісію оксиду вуглецю; Знайти оптимальну концентрацію метану в суміші; Дослідити вплив висоти реактора на хімічний недопал та емісію оксиду вуглецю.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація- 22 аркушів А4

7. Орієнтовний перелік публікацій: Вплив розміру вугільних частинок на процес їх горіння у суміші метану та кисню.

8 Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
2	п.н.с., к.т.н. Кобзар С. Г.		
3	п.н.с., к.т.н. Кобзар С. Г.		

9 Дата видачі завдання « 10 » вересня 2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Опрацювання літератури за темою	10.09.2018 - 31.10.2018	
2.	Написання літературного огляду	01.11.2018 - 25.12.2018	
3.	Моделювання горіння вугільного палива	05.01.2019 - 18.03.2019	
4.	Написання другої частини дипломної роботи	19.03.2019 - 19.04.2019	
5.	Підготовка тез	22.04.2019 - 24.04.2019	
5.	Виступ на конференції	25.04.2019	
6.	Написання третьої частини дипломної роботи	01.05.2019 - 24.05.2019	
7.	Написання висновків	24.05.2019 - 31.05.2019	
8.	Подання роботи на рецензування	01.06.2019	
9.	Підготовка доповіді та презентації	03.06.2019 - 10.06.2019	
10.	Подання роботи до захисту	18.06.2019	

Студент

(підпис)

Б. М. Полванов

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник роботи

(підпис)

С. М. Пономаренко

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломної роботи за обсягом становить 60 сторінок, містить 1 таблицю та 31 рисунок. Для дослідження було використано 35 бібліографічних найменувань.

Метою роботи є дослідження впливу розміру вугільних частинок на екологічність та коефіцієнт корисної дії і визначити методи за допомогою, яких можна впливати на процес горіння вугільного палива у циліндричному проточному реакторі. Враховуючи складний характер процесу горіння, складність проведення експерименту, було виконано дослідження за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням комерційного пакета ANSYS Fluent 19.2.

В результаті аналізу показано, що розміри вугільних частинок впливають на екологічність та ефективність процесу горіння. Також було продемонстровано, що метаноповітряна суміш збільшує екологічність та коефіцієнт корисної дії реакторної установки. Було показано, що висота реактора впливає на екологічність та коефіцієнт корисної дії.

Ключові слова: *процес горіння, вугільний пил, реактор, метан, повітря.*

SUMMARY

The diploma work explanatory message includes 60 pages of the text, 1 table and 31 illustrations. At the problem modern state analysis, overall 35 references were used.

The purpose of this work is to study the influence of the size of the coal parts on the ecology and the coefficient of performance and to determine the method of use that may have an affect on the process of coal fuel preparation in a cylindrical flow reactor. Considering the complex nature of the combustion process, the complexity of the experiment, we used computer simulation using the software package ANSYS Fluent 19.2.

As a result of the analysis it is shown that the size of the carbon particles affects the ecology and the performance of the combustion process. It has also been demonstrated that the methane air mixture increases the ecology and the coefficient of performance of the reactor plant. It has been shown that the height of the reactor affects the ecology and the coefficient of performance.

Key words: *combustion process, coal dust, reactor, methane, air.*

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.	5
ВСТУП.	6
РОЗДІЛ 1. Сучасний стан проблеми	7
1.1. Особливості процесу горіння.	7
1.2. Класифікація процесу горіння	8
1.3. Прості типи хімічних реакторів.	9
1.4. Властивості та класифікація вугілля.	10
1.5. Горіння вугільної частинки в повітрі.	12
1.6. Реагування вугільних частинок в потоці газу.	17
1.7. Горіння метану.	20
1.8. Каталітичне горіння вугільних частинок	21
1.9. Загоряння суміші при температурах 800 — 1200 К	23
1.10. Горіння фронту полум'я дисперсної суміші	26
1.11. Висновки до розділу 1.	27
РОЗДІЛ 2. Комп'ютерне моделювання горіння вугільних частинок	29
2.1. Моделювання процесів горіння	29
2.1.1. Основні рівняння балансу	29
2.1.2. k - ϵ модель	30
2.1.3. k - ω модель.	31
2.2. Модель випромінення P-1	31
2.3. Рівняння руху частинок	33
2.4. Горіння поверхні частинки	33
2.5. Механізми газифікації вугільного палива.	35
2.6. Механізм горіння метану	36
2.7. Розподіл частинок по їх діаметру	37
2.8. Верифікація горіння вугільного палива	37
2.9. Геометрична 2D-модель	39
2.10. Вхідні параметри моделі	41
2.11. Висновки до розділу 2.	44

	4
РОЗДІЛ 3. Результати дослідження та їх аналіз	45
3.1. Горіння вугільного пилу в повітрі	45
3.2. Горіння вугільного пилу в реакторі більшої висоти	49
3.3. Горіння вугільного пилу в метаноповітряній суміші	52
3.4. Висновки до розділу 3	54
ВИСНОВКИ.	56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	57

Латинські символи:

c — теплоємність;

H — ентальпія;

k — кінетична енергія турбулентності;

M — молярна маса;

$\dot{m}_k$ — середня швидкість реакції;

P — абсолютний тиск;

p — парціальний тиск;

R — універсальна газова постійна;

T — абсолютна температура;

u, v, w — компоненти швидкості;

x, y, z — координатні осі;

Y_i — масова концентрація.

Грецькі символи:

α — коефіцієнт надлишку повітря;

λ — коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

μ — динамічна в'язкість, Н·с/м²;

ρ — густина, кг/м³.

На сьогоднішній день використання процесів горіння з метою отримання енергії відіграє визначальну роль в енергетиці та інших галузях промисловості. Так, близько 80 % всієї енергії, що виробляється в даний час в світі, припадає на паливну енергетику.

Процеси горіння використовуються для отримання рушійної сили різних транспортних засобів, починаючи від паровоза і аж до сучасних ракетних двигунів, автомобілів, літаків, суден і т.д. Важливим напрямком в науці про горіння є екологічні аспекти горіння, які отримали великий розвиток останнім часом. До них відносяться технологія спалювання побутових відходів, вивчення механізмів утворення екологічно шкідливих продуктів згоряння (оксиди азоту, сажа, сполуки хлору). Ці дослідження дозволяють знайти умови, при яких концентрація токсичних речовин у викидах мінімальна.

Одним з видів викопного палива, який використовується в паливній енергетиці, поряд з природнім газом, є вугілля. За рахунок його подрібнення, воно легше займається і краще горить, крім того має низьку ціну і велику теплоту виділення. Дослідження процесу горіння вугільного пилу має на меті пошук оптимального способу його спалювання як з енергетичної, так і з екологічної точки зору. Однак, в експериментальних дослідженнях важко відтворювати процес горіння в умовах, близьких до таких, що відбуваються в топці енергетичної установки, тому, для більш повного врахування складних умов горіння плідним може бути залучення методів комп'ютерного моделювання.

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ

1.1. Особливості процесу горіння

Процес горіння відноситься до складним фізико-хімічних явищ. З фізичної точки зору являє собою тепло та масообмін в системі. З хімічної точки зору являє собою окислювально-відновлювані реакції, що відбуваються під час переходів електронів від одних молекул до інших.

Речовини, які можуть віддавати електрони називаються відновниками, а речовини, які захоплюють — називаються окисниками.

Окиснення — це процес під час якого елемент віддає електрони. Речовини, які віддають валентні електрони називаються відновниками.

Відновлення — це процес під час якого елемент отримує електрони. Речовини, які отримують валентні електрони називаються окислювачами.

Горіння відноситься до швидких явищ. Не всі окислювально-відновлювальні реакції являються горінням. Так, до них не відносяться повільні або дуже швидкі реакції.

Горіння відбувається з виділенням теплоти. Також, повинна бути стійка реакція. Це означає, що сумарна теплота повинна бути достатньою, щоб реакція могла поширюватись.

Для створення та підтримки горіння потрібно паливо та окислювач. При наявності даних компонентів реакція може не відбуватися, тобто потрібно створити початкові стан при якому можлива реакція. Другою умовою для створення горіння є наявність імпульсу, який буде підтримувати процес.

Отже, горіння — це складна екзотермічна реакція, яка відбувається швидко та супроводжується виділенням диму, енергії у вигляді тепла та світлового випромінення [18].

1.2. Класифікація процесу горіння

Процес горіння можна класифікувати за декількома ознаками (хімічними або фізичними). Речовини, які взаємодіють між собою під час хімічних реакцій можна поділити на тверді, рідкі та пароподібні. Якщо реакція відбувається між елементами, які знаходяться в одному агрегатному стані, то такий процес називають гомогенним. Якщо реакція відбувається між елементами, які знаходяться в різних агрегатних станах, то такий процес називають гетерогенним.

На швидкість гомогенної та гетерогенної реакції впливає температура, концентрації пального та окислювача у суміші. [18].

В залежності від швидкості реакції та початкової змішуваності, розрізняють два режими горіння: кінетичне та дифузійне.

Кінетичне горіння — це горіння, внаслідок якого елементи суміші змішуються між собою у початковий момент часу. Швидкість горіння визначається тільки швидкістю хімічної реакції.

Час горіння довільної хімічної реакції визначається формулою.

$$t_{\text{гор}} = t_{\text{хр}} + t_{\text{фв}}$$

де $t_{\text{хр}}$ — час горіння реакції, $t_{\text{фв}}$ — час фізичної взаємодії.

Для кінетичного горіння $t_{\text{хр}} \ll t_{\text{фв}}$, тому $t_{\text{гор}} = t_{\text{хр}}$.

Дифузійне горіння — це горіння, яка відбувається у зонні змішування компонентів реакції. Час горіння в даному випадку $t_{\text{хр}} \gg t_{\text{фв}}$, тому $t_{\text{гор}} = t_{\text{фв}}$

За механізмом поширення реакції поділяють на два типи: дефлаграцію та детонацію. Дефлаграційне горіння характеризується малою швидкістю розповсюдження зони горіння (декілька метрів за секунду). Даний тип горіння може відбуватися за підвищеною температурою.

Детонаційне горіння відбувається при дуже великих швидкостях (сотні метрів за секунду) і може виникнути в середовищі, яке швидко стискають.

Детонація являє собою різновидність вибуху, при якому виникає потужна ударна хвиля.

По складу продуктів горіння розрізняють повне та неповне горіння. Повне горіння відбувається з виділенням повних оксидів (CO_2 , H_2O). Неповне горіння відбувається з виділенням неповних продуктів горіння (NO , CO_2) [26].

1.3. Прості типи хімічних реакторів

Розглянемо прості типи хімічних реакторів в яких відбувається реакція горіння рис. 1.1. Вважатимемо, що перші три системи не змішуванні. Четверта система є реактором з плавним потоком в якому повністю враховується змішування і дифузія. Дані концепції можуть бути використанні для конструювання більш складних систем. Розглянемо кожну реактор окремо.

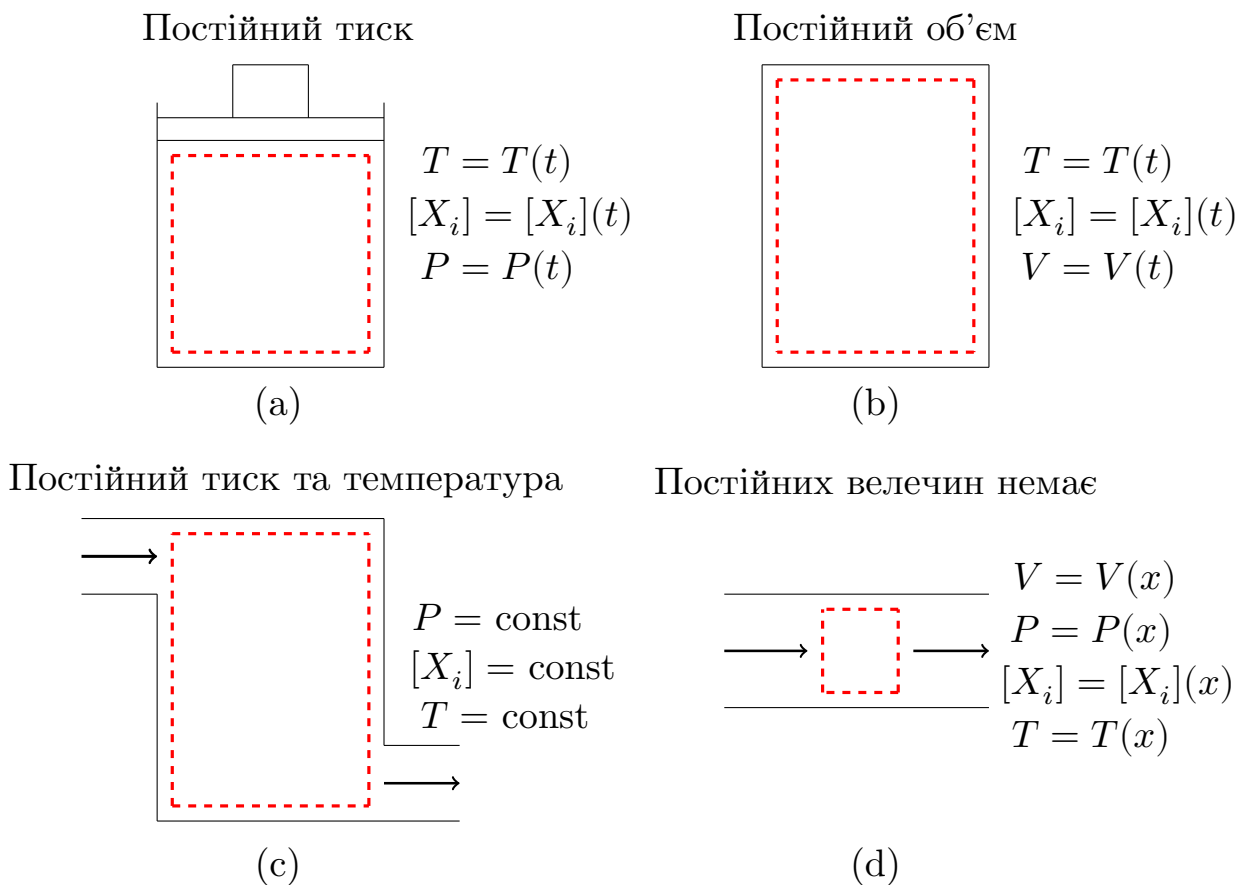


Рис. 1.1. Типи реакторів [13]

Система сталого тиску та маси складається з циліндра та поршня, який може змінювати своє положення вздовж вертикальної осі таким чином, щоб

підтримувати постійний тиск. На межах градієнт температур постійний. Реагенти реагують в кожному місці обмеженого об'єму. Градієнт температур не змінюється. Під час реакції горіння, об'єм та температура збільшуються в часі. Концентрація частинок з часом змінюється.

Система сталого об'єму та маси складається замкнутого тіла в середині якого знаходяться реагенти. В даному випадку температура, тиск та концентрація змінюється з часом. Повна енергія не змінюється.

Система перемішування реагентів складається з замкнутого ректора, який має вхід та вихід. На вхід подається речовини, які потім перемішуються в реакторі. Після цього вони виходять.

Реактор плавного потоку складається з труби в яку подаються реагенти. Термодинамічні параметри міняються вздовж напрямку руху суміші. У реакторі перебуває стабільний потік. Ніякого змішування вздовж потоку не відбувається. Дифузія незначна. Температура, тиск та концентрація даної системи залишається сталою [13].

1.4. Властивості та класифікація вугілля

Вугілля — це вид палива, утворений шляхом вуглефікації залишків рослин. Вугілля по природі походження поділяють на: гуміти, сапропеліти, ліптобіоліти. Гуміти є найбільш розповсюджуваним типом у світі. Вони являють собою вуглець, який містить не велику кількість смоли та кутіну.

Ліптобіоліти в основному складаються з смоли та кутіну. Гуміти та ліптобіоліти походять від нижчих рослин. Сапропеліти являються самими чистим вугіллям. Даний тип походить від нижчих рослин. В промисловості існують три види вугілля: кам'яне вугілля, буре вугілля, антрацити.

Всі види вугілля, які зустрічаються в природі являються складними речовинами в органічний склад яких входять вуглець, вода, кисень, азот, зола та інші. Для характеристики складу вугільних частинок використовують відсоткове співвідношення. Склад органічної маси не визначає в достатній мірі

характеристики вугілля. На практиці, знання складу вугілля являється достатньою умовою для розрахунку основних термодинамічних характеристик [15].

Механічні властивості відіграють важливу роль в процесі горіння вугілля. Для характеристики механічних властивостей використовують міцність, твердості, дробимість. Знаючи фізико-механічні властивості палива можна судити про хімічні властивості. Механічні властивості вугілля залежать від числа міцних зв'язків просторової структури.

Для термодинамічних характеристик вугілля використовують питому теплоємність, теплопровідність, теплоту розкладання, та коефіцієнт теплового розкладання. Питома теплоємність залежить від вологості вугілля. Також, наявність домішок або лози впливає на теплоємність.

Теплопровідність — це величина, яка визначає здатність тіла проводити тепло. Чим вона більша тим швидше тіло проводить тепло. На дану характеристику впливає фізичний стан частинки — подрібнений або суцільний. Вугільні частинки являються теплоізоляторами. Їхня провідність збільшується з зростом температури. На теплопровідність впливає пористість структури. Чим менша кількість пористість, тим менша теплопровідність [28].

При нагріванні вугілля в повітряному середовищі відбувається газифікація. Газифікація — це процес окислення твердого палива, яке відбувається при високій температурі. Продуктами реакції являються летючі речовини. Твердий залишок, який утворюється при розкладанні палива називається коксовим залишком. Разом з летючими речовинами з вугілля видаляється волога, а у твердому залишку залишається зола. Вихід летючих в кам'яному вугіллі 8% — 50%. В бурому вугіллі вихід летючих складає 45% — 55%. Найбільший вихід летючих в сапропелітів 60,53 — 86,17%.

При окисненні властивості вуглецю змінюються в різних напрямках. Наприклад, маса частинки зменшується внаслідок хімічної реакції на поверхні. Процес окиснення відбувається з виділенням теплоти. Енергія накопичується в частинці або розсіюється в просторі. Внаслідок накопичення тепла може відбутися samozapalovannya. Цей процес найгірше проходить у сухому вугіллі,

а найефективніше з вологим. Також, основною умовою самозапалювання являється розмір частинок. Великі куски майже не самозапалюються. Маленькі частинки найкраще піддаються процесу горіння, а великі найгірше. Відчутно впливає на процес вміст кисню та теплопровідність палива [15].

1.5. Горіння вугільної частинки в повітрі

Важливим хімічним процесом, який відбувається з вугіллям є горіння.

Розглянемо процес горіння вугільної частинки в замкненому повітряному середовищі з концентрацією повітря c_0 на яке діє джерело теплового випромінювання. Нехай, на частинку діє турбулентний потік. Вважаємо, що реакція окиснення відбувається на сферичній поверхні. Обмін теплом відбувається конвекцією та теплопровідністю [29].

Вважатимемо, що діаметр частинки під час горіння зменшується, тобто вплив золи відсутній. Це спрощує математичні рівняння, тому що зола перешкоджає дифузії повітря до поверхні частинки. Також, нехтуємо розбуханням частинок під час горіння [30].

Процес горіння вугільних частинок являє собою складний фізико-хімічним явищем, який відбувається з виділення та поглинанням тепла та виходом продуктів згоряння [27].

В початковий момент часу температура середовища більша за температуру частинки. Під час нагрівання на поверхні палива відбуватиметься газифікація. Внаслідок цього процесу з неї виходять горючі гази, які реагують в газовій фазі, а коксова маса — в гетерогенному режимі [29].

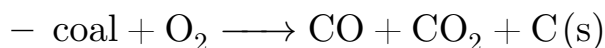
Горіння та газифікація являються дуже схожими хімічними процесами, які протікають з об'єднанням кисню та вуглецю, але між ними існує незначна різниця. Різниця полягає в тому, що хімічне тепло палива під час газифікації переходить в хімічне тепло горючих газів.

Взаємодія вуглецю з киснем являється найголовнішою реакцією в газифікації вугільних частинок. Це зв'язано з тим що коксова частина палива

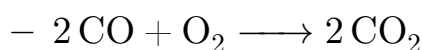
займає більшу частину маси твердого палива. Також, реагування коксового залишку являється найдовшою стадією та являється основним джерелом тепловиділення [21].

Процес горіння вугільної частинки можна поділити на декілька послідовних етапів. Вони наведені на рис.1.2.

а) Етап 1



б) Етап 2



в) Етап 3

– Нагрівання коксового залишку

г) Етап 4

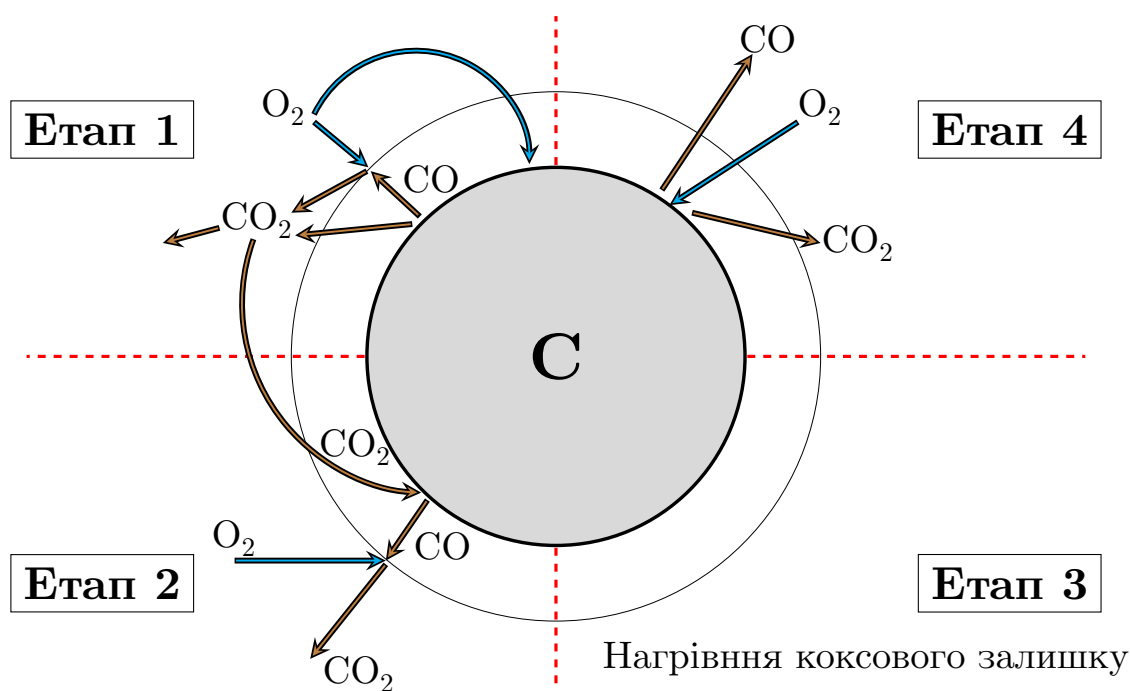
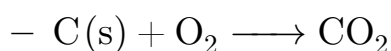
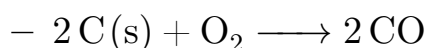


Рис. 1.2. Схема горіння вугільної частинки

Утворення продуктів горіння залежить від температури. При низьких температурах утворюється CO₂, а при високих CO [29].

Процес протікання реакції залежить від швидкості хімічної реакції. Швидкість горіння залежить від температури та концентрації кисню та описується законом Арреніуса:

$$W_c = K \cdot p \cdot m_{\text{ок}} \cdot e^{-\frac{E}{RT_0}}$$

де W_c — швидкість хімічної реакції на одиницю площі вугільної частинки, K — константа, p — локальний тиск, $m_{\text{ок}}$ — масова доля O_2 в суміші газів, E — енергія активації [30].

Якщо частинка вугілля приставляє собою пористу структуру, то горіння може відбуватися, як на поверхні так і всередині. Також, реакція може протікати в кінетичних або дифузійних областях. При низьких температурах швидкість дифузії може перевищувати швидкість хімічної реакції. В цьому випадку горіння відбувається в всьому об'ємі пористої структури. Такий процес називається «внутрішньою дифузією».

При збільшенні температури швидкість хімічної реакції є більша за швидкість дифузії. В даному випадку глибина внутрішнього горіння є змінною величиною, яка залежить від швидкості внутрішньої дифузії та швидкості хімічної реакції. При дуже великих температурах, швидкість хімічної реакції стає настільки великою, що процес горіння починає визначатися тільки поверхневою дифузією [21].

Розглянемо час необхідний для того, щоб вугільна частинка згоріла в атмосфері повітря. Його можна поділити на чотири компоненти: прогрів частинки до горіння горючих, горіння горючих, прогрів коксового залишку, горіння коксу. Досліди показують, що час прогріву частинок до запалення горючих не залежить від концентрації повітря. На неї впливає: початкова температура середовища, інтенсивність подачі теплоти в середовище, розмір частинок, вологість частинки, теплоємність, виділенням горючих. Час нагрівання визначається по формулі:

$$\tau_{\text{в.г}} = k_{\text{в.г}} \cdot 5,3 \cdot 10^{14} \cdot T_{\text{в.г}} \cdot \delta^{0,8}$$

де $T_{\text{в.г}}$ — температура навколишнього середовища, δ — початковий розмір частинки, $k_{\text{в.г}}$ — відносний коефіцієнт, який визначається перевіреним шляхом.

Число Біо не повинно перевищувати одиницю. В цьому випадку перепад температур на поверхні та всередині для малої частинки $100 - 150^{\circ}\text{C}$ для великої частинки $200 - 250^{\circ}\text{C}$.

Час горіння горючих відраховується від початку загоряння їх до повного зникнення коло поверхні частинки.

Зовнішній вид полум'я горіння горючих має різний вид. В першому випадку горіння являє собою вибух, який відбувається з бурним виділенням продуктів горіння.

В іншому випадку внаслідок утворення коксової пористості горючі виходять рівномірно по всій поверхні. Фронт полум'я у такому випадку має сферичну форму.

Формула для визначення часу горіння визначається, як

$$\tau_{г.г} = k_{г.г} \cdot 0,5 \cdot 10^6 \delta^2$$

де $\tau_{г.г}$ — час горіння горючих, $k_{г.г}$ — коефіцієнт, який є характеристикою марки вугілля.

Тривалість третьої фази визначається, як час, який відраховується від моменту затухання полум'я горючих до моменту загоряння всієї поверхні частинки.

Для кожної марки вугілля існує окрема формула, яка визначає час нагрівання коксу.

Повний час нагрівання частинки до моменту загоряння коксового залишку визначається, як:

$$\tau_{п.ч} = \tau_{в.г} + \tau_{г.г} + \tau_{п.к} \quad (1.1)$$

Формула (1.1) може бути описана наступним виразом:

$$\tau_{п.ч} = 1,12 \cdot 10^{10} \cdot k_{в.к} \frac{\rho_y \cdot \delta^{1,2}}{T_g^3} \left(-\frac{21}{O_2} \right)^n$$

де $k_{г.к}$, n — коефіцієнт, який визначається для кожної марки вугілля, ρ_y — густина вугілля, в повітряно-сухому стані, T_g — температура середовища.

Час горіння коксового залишку може бути визначена, як:

$$\tau_{п.к} = k_{п.к} \cdot 2,21 \cdot 10^6 \frac{100 - A_k}{100} \cdot \frac{\rho_k \delta^2}{T^{0,9} O_2}$$

де $\tau_{п.к}$ — час горіння коксу, A_k — концентрація коксу, O_2 — концентрація повітря [34]. Можна визначити подачу потоків всіх газів, які взаємодіють з частинкою. Подача потоку повітря виражається по формулі:

$$G_{O_2} = \alpha_m (c_{п} - c_0) \quad (1.2)$$

де α_m — коефіцієнт теплообміну .

Кисень, який поступає на поверхню частинки, реагує з вуглецем. Густина потоку вугілля, яке виділяється під час реакції визначається, як:

$$G_C = k c_{п} \quad (1.3)$$

де k — константа швидкості реакції.

Прирівняємо формули (1.2), (1.3) та здійснивши елементарні математичні перетворення отримаємо.

$$G_C = \frac{c_0}{\left(\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha_m}\right)}$$

З формули видно, що існує два режими горіння частинки.

Якщо, $\alpha_m \ll k$. В цьому випадку отримаємо

$$G_C = \alpha_m c_0$$

З даної формули випливає, що швидкість реакції залежить від дифузії, тому таке горіння називається дифузійним.

Якщо, $\alpha_m \gg k$

$$G_C = k c_0$$

В даному випадку швидкість реакції визначається кінематичними характеристиками. Даний тип реакції називається кінематичними. Якщо α_m та k не

сильно відрізняються один від одного, то на процес горіння впливають дифузійні та кінематичні складові. Коефіцієнти α_m та k залежать від температури. На коефіцієнт α_m впливає розмір частинок [17].

1.6. Реагування вугільних частинок в потоці газу

Процес горіння вугільних частинок у потоці має свої переваги. Цей спосіб дозволяє сполувати паливо з максимальним енергетичним виділенням та мінімальним виходом вугільного осаду. Це забезпечує хороший контакт палива з зовнішнім середовищем. Мінусом являється складність подрібнення частинок до дуже малих розмірів.

Вугільний пил подається у топку котла первинним повітрям. Перед камерою згоряння вугільні частинки проходить етап нагрівання та газифікації. Паливо складається з частинок різного діаметру. Маленькі пилинки загоряються першими. Процес запалювання більших частинок набагато довший. Під час горіння потрібно, окрім основних характеристик палива враховувати зовнішні параметри, які визначаються особливостями конструкції. Реакція горіння відбувається у пиловугільному факелі.

Пиловугільний факел — це не ізотермічний струмінь, який розповсюджується в просторі. Перед запалюванням струменю потрібно провести підготовку палива. Запалювання відбувається на границі струменю і розповсюджується в глибину утворюючи факел. Час загоряння залежить від початкової температури, густини помоку, концентрації пилі [27], [34].

Важливим параметром факелу є температура горіння частинок. Вона не може бути розрахована теоретично, тому що в формули входять багато коефіцієнтів, значення який не відома. Для визначення температури частинки використовують спеціальну апаратуру [16].

Розглянемо особливості процесу горіння пиловугільної суміші повітря, яке рухається. Нехай частинки рухаються паралельно потоку та мають нульову швидкість відносно газу. Вважатимемо, що температура потоку не змінюється.

Відносна концентрація палива визначається по формулі:

$$\mu_0 = \frac{G_{T_0}}{G_{\Gamma_0}} = \frac{G_{T_0}}{v_0 \cdot c_0}$$

де v_0 — середня початкова швидкість потоку газу, c_0 — середня реагуюча концентрація газу, G_{T_0} — вагова кількість палива, G_{Γ_0} — вагова кількість реагуючого газу. Початковий радіус частинки r_0 , а радіус згорілої частинки r . Знайдемо зв'язок між G_T та радіусом вектора. В усіх областях потоку концентрація частинок n не змінюється. Витрата палива в початковий момент

$$G_{T_0} = \frac{4}{3}n_0 \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \gamma_T$$

де γ_T — константа, яка визначається для кожного палива окремо. В любий інший момент.

$$G_T = \frac{4}{3}n_0 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \gamma_T$$

Із співвідношень випливає, що

$$\frac{G_T}{G_{T_0}} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^3 = \vartheta^3 = \Omega$$

де ϑ — відносний радіус частинок, Ω — відносна кількість палива в різних перерізах. Кількість реагуючого палива

$$\delta G_T = G_{T_0} - G_T = G_{T_0} \left(1 - \frac{G_T}{G_{T_0}}\right) = G_{T_0} (1 - \vartheta^3) \quad (1.4)$$

Позначимо через $G_{T_0}^m$ теоретично необхідну кількість газу при стохастичному реагуванні. Введемо стохастичне співвідношення $M = G_{T_0}/G_{T_0}^m$ та коефіцієнт надлишку реагуючого газу $\alpha = G_{T_0}^m/G_{T_0}$.

Формулу (1.4) можна записати:

$$\Delta G_T = \Delta G_\Gamma M = M(v_0 c_0 - v c) \quad (1.5)$$

Якщо вважати, що швидкість потоку не змінюється $v = v_0$ (1.5) приймає вид

$$c - c_0 = \frac{c_0}{\alpha}(\vartheta^3 - 1) \quad (1.6)$$

Формули (1.4) — (1.5) дають можливість охарактеризувати процес та довжину зони горіння. На довжину зони впливає: початкова концентрація речовин, швидкість течії, температура та дифузія, початковий діаметр частинок.

Продукти, які утворюються внаслідок газифікації палива мають низьку температуру горіння, ніж коксовий залишок, тому загоряння суміші відбувається раніше. Згорання пило-повітряної суміші поліпшується при збільшенні початкової температури. Також, на швидкість реакції впливає концентрація повітряної суміші.

Пило-повітряна суміш після загоряння утворює факел. Частина виділеної теплоти йде на прогрів та загоряння потоку суміші, яка знаходиться зверху факелу. На рис. 1.3 показано зміну концентрації O_2 і CO_2 , а також температури.

Частина шару суміші де відбувається інтенсивне споживання повітря називається кисневою зоною, а частина зони, де протікають відновлювані реакції називається зоною відновлення. Концентрація вуглекислого газу в кінці кисневої зони є максимальною. На кінцеву концентрацію продуктів горіння впливає: вид палива, розміри частинки, довжина факелу (зони горіння), підігрів та швидкість повітряного потоку, концентрація повітря в середовищі. Довжина кисневої зони не залежить від швидкості повітряного потоку. Вона дорівнює 3 — 5 діаметрам частинок.

Найкраща суміш утворена в результаті змішування знаходиться в зоні горіння. Також, на змішуваність суміші та на ефективність горіння впливає температура [21], [34].

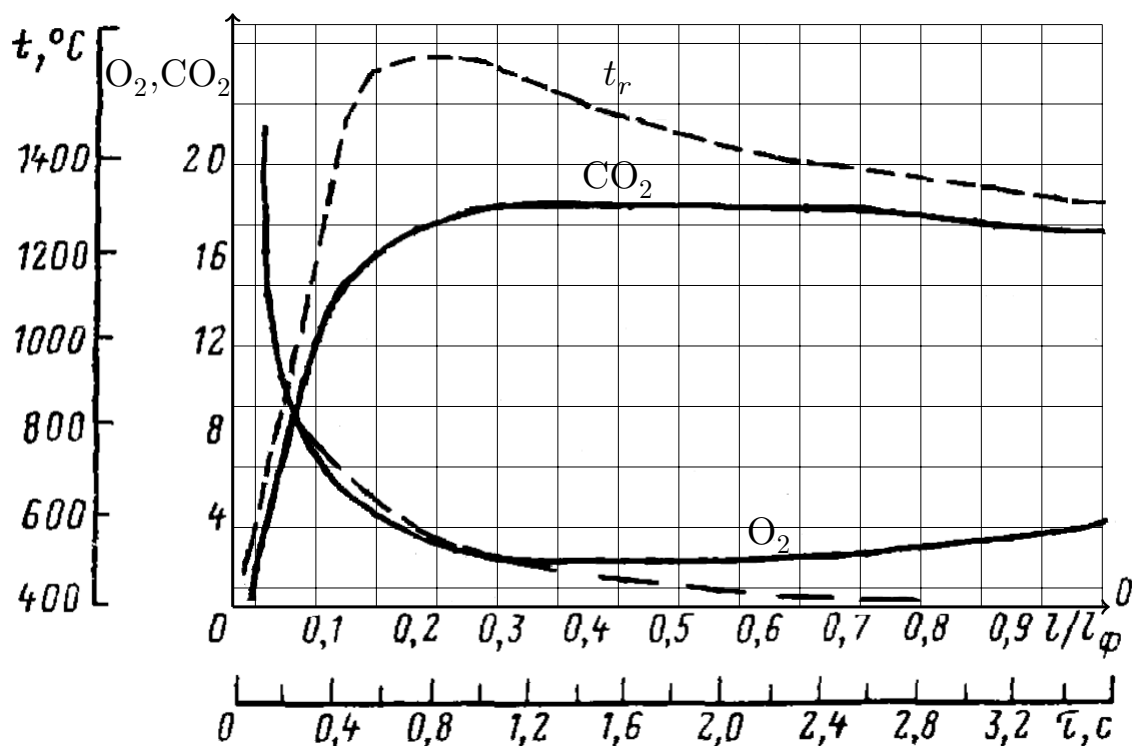


Рис. 1.3. Динаміка газоутворення [21]

1.7. Горіння метану

Метан — найпростіша сполука, яка складається з молекул вуглецю та водню. Даний газ немає кольору та смаку. Також, він у два раз легший за повітря. Метан отримують напряму з газу або синтетичним шляхом.

Метан окислюється в температурному інтервалі $550 - 700^{\circ}\text{C}$. При цьому перетворення метану становить $5 - 8\%$. Збільшення тиску до 100 атмосфер зменшує температуру горіння до $350 - 400^{\circ}\text{C}$. У даному випадку перетворюється 70% . Внаслідок малого перетворення та невеликому виходу корисних продуктів реакція горіння метану не використовуються у промисловості.

Для збільшення ефективності реакції використовують каталізatori. Застосування каталізатора дозволяє використовувати газ для отримання корисних речовин. Для цього метан та водяну пару пропускають через каталізатор при $700 - 800^{\circ}\text{C}$. З метану можна отримати ацетилен [20], [19].

1.8. Каталітичне горіння вугільних частинок

Молекули кисню та азоту інтенсивно взаємодіють з навколишнім середовищем та тілами. Це відбувається внаслідок явища адсорбції, яке виникає внаслідок дії сили Ван-дер-Вальса між твердим тілом та газом, яке його оточує.

Існує хімічна та фізична адсорбція. Спочатку відбувається фізична адсорбція, а потім хімічна. Також, при цьому відбувається виділення теплоти та інфрачервоного випромінювання.

Вугільні частинки разом з метаном та киснем утворюють горючу суміш. Нехай, ця суміш рівномірно розподіляється в замкнутому просторі. Максимальне тепловиділення реакції окиснення метану та кисню відбувається, коли в повітрі знаходиться 10% CH_4 . Внаслідок явища адсорбції на поверхні вугільної пилі утворюється повітряна плівка рис. 1.4.

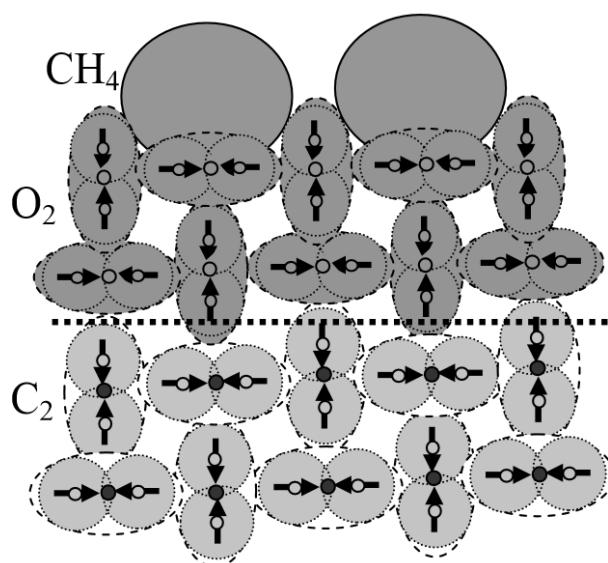


Рис. 1.4. Розподіл молекул метану, кисню та вуглецю в суміші [23]

Метан взаємодіє з киснем навкруг вугільної частинки. Частинка в даному випадку виступає каталізатором. Це може бути причиною каталітичного samozapalювання метану. Внаслідок реакції виділяється теплота, яка запалює частинку вугілля.

Кінетична реакція горіння характеризується формулою:

$$\frac{dn}{dt} = k_f n_T n_k$$

де n кількість реагуючої речовини в одиницю об'єму за час t , k_f — константа прямої реакції, n_T — концентрація метану, n_k — концентрація кисню.

Константа хімічної реакції:

$$k_f = 2(r_1 + r_2)^2 \left(\frac{2\pi k_B}{\mu} \right) \exp \left\{ -\frac{E_a}{k_B T} \right\}$$

де r_1, r_2 — радіуси взаємодії частинок, μ — приведена маса, E_a — енергія активації [33].

В потрібній системі критична температура є функцією, яка описує стан системи. Нехай у нас є дві криві для метаноповітряної та гібридної суміші (рис. 1.5).

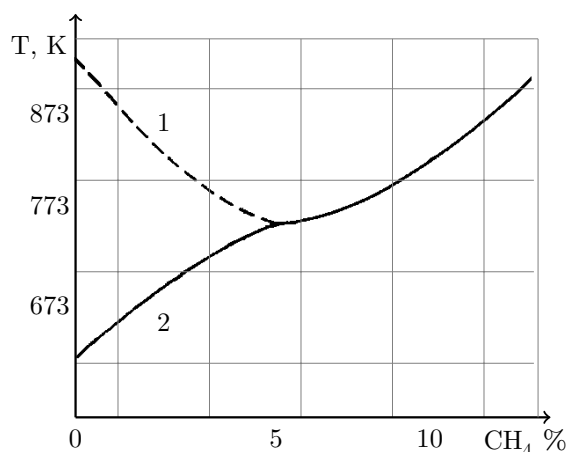


Рис. 1.5. Залежність критичної температури від концентрації метану для метаноповітряної (1) та гібридної суміші (2) [25]

На рисунку видно, що при певних концентрації метану в суміші та температурі критична функція температури для двох систем співпадають. Це свідчить про газофазний механізм горіння вугільної пилі, що відповідає квазістаціонарній моделі теплового вибуху. Починаючи з критичної температури суміш реагує в квазістаціонарному режимі. Температура частинок та газу спочатку росте майже однаково для кожної компоненти системи. Якщо температура суміші дорівнює температурі загоряння однієї частинки, то тепловіддача становить малою в порівнянні з тепловиділенням. Під час квазістаціонарної реакції газифікація полегшується. Таким чином, всі хімічні процеси, які відбуваються в системі визначаються критичними параметрами.

Пониження температури середовища впливає на час індукції в потрійній системі та на концентрацію летких. Межа горіння системи відповідає випадку, коли концентрація летючих досягає значення мінімуму температур на кривій. Додавання метану впливає на концентрації та стехіометричність, що зменшує температуру загоряння системи [23].

Процес горіння може бути стійким або не стійким. На стійкість можуть впливати параметри системи, концентрація речовин. Дисперсійна суміш, яка містить малу концентрацію вугільних частинок може детонувати. Якщо окремо розглядати горіння частинок та метану, то детонація не відбувається.

Вугільна фракція впливає на швидкість розповсюдження полум'я. Мала концентрація частинок пришвидшує рух фронту. Також на процес горіння можуть впливати різні фракції. Частинки з малими діаметром загоряють швидше, ніж великі. Суміш з великим відсотковим вмістом маси дрібно-дисперсної фракції горить стійко у великому діапазоні швидкостей подачі палива. Наявність інертних частинок зменшує стійкість горіння [25].

1.9. Загоряння суміші при температурах 800 — 1200 К

Вивчення горіння дисперсійних систем актуально на сьогоднішній день. Відомо, що гібридні суміші загоряються при меншій енергії зовнішнього фактору, ніж суміш вугільної пилі у повітрі. Вивчення горіння трьох компонентної суміші може допомогти вченим та інженерам створити нові режими горіння [24].

Найбільшим з практичної точки зору являється вивчення горіння вугільно-метано-повітряної суміші. Було проведено десятки експериментальних та числових досліджень, які показують, що вміст дисперсійних параметрів у газовій суміші може збільшувати швидкість ламінарної течії [35].

Розглянемо установку швидкого стискання (УШС) у яких знаходиться дисперсійна суміш метану кисню та вугільних частинок розміром 32 мкм та масою 5 мг. В ході експерименту температура в УШС досягала до 800 — 1200 К, а тиск 1,5 — 2,0 МПа. Процес загоряння фіксувався за допомогою надшвидкої камери LaVision HighSpeedZtar X з частотою кадрів 12 500 кадрів/с і роздільною

здатністю 1024 x 1023 пікселів. Спостереження проводилися через кварцове вікно діаметром 50 мм. Виміри тиску проводилися високотемпературним п'єзоелектричним датчиком Kistler 6021U18. Випромінювання СН радикалів виділялося із загального випромінювання за допомогою двох вузькополосних інтерференційних фільтрів.

На рис. 1.6 представлені сигнали тиску і фотоелектронних помножувачів, а також послідовність кадрів.

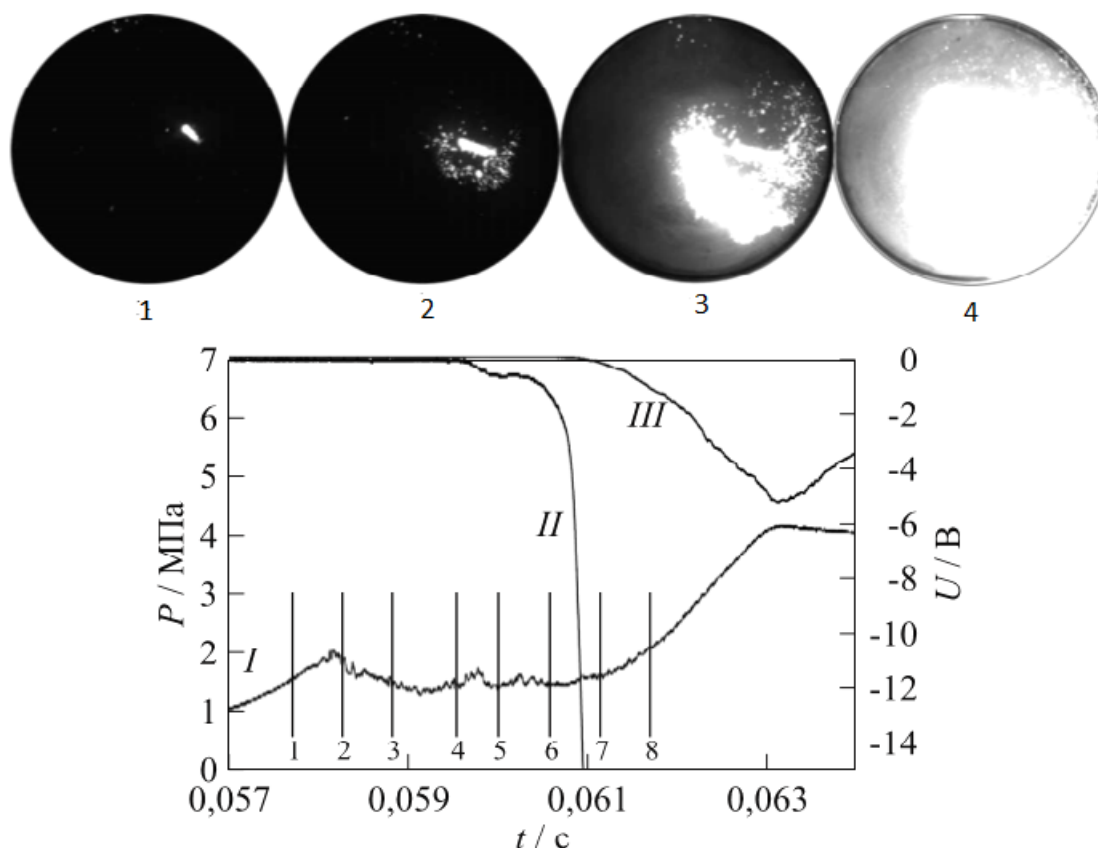


Рис. 1.6. Динамічна зміна тиску 1, випромінювання світла 2 і світіння радикалів СН 3 виявлених при запалюванні гібридної суміші [24]

Загоряння окремих вугільних частинкою відбувається в процесі стискання при температурі 880 К. На кадрах 4 та 5 видно, як над поверхнею частинки розпочинає горіти метан. При низьких параметрах кількість експериментів із запалюванням гібридної суміші зменшується.

Досліди показують, що запалювання газової суміші відбудеться при температурах від 850 К. На фотокадрах було зафіксовано частинки, які загоряють набагато швидше, ніж при високих температурах. Напевно, розмір цих частинок набагато менший за середній розмір частинок суміші.

Результати всіх експериментів зображено на рис. 1.7. З графіку можна дійти висновку, що додавання вугільних частинок розміром 20 — 32 мкм в зменшує температуру загоряння та час нагрівання. В усіх випадках температура горіння вугільних частинок складає приблизно 2500 К. Вона не залежить від концентрації метану в середовищі [24].

Концентрація метану впливає на температуру запалювання суміші. Ця залежність виражається формулою:

$$C_{\text{уп}}^{\text{CH}_4} = 53,5 \exp(-0,045V^r - 0,69C_{\text{CH}_4}) + 1,4 \exp(-0,032V^r)A_c$$

де $C_{\text{уп}}^{\text{CH}_4}$ — нижня концентраційна границя загоряння дисперсійної суміші, C_{CH_4} — концентрація метану в просторі, V^r — вихід летючих, A_c — концентрація вугілля.

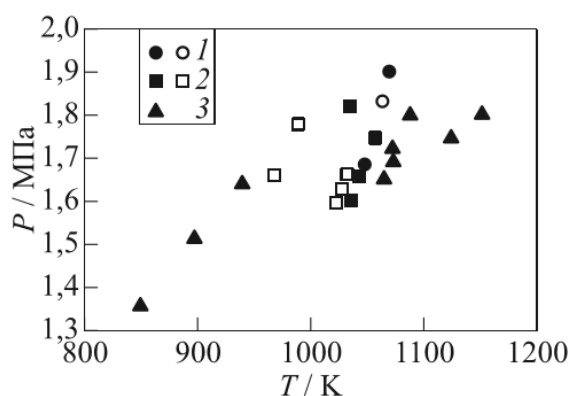


Рис. 1.7. Параметри газового середовища при яких відбулося загоряння метаноповітряної суміші 1, вугільноповітряної 2, гібридної 3 [31]

Можна виділити чотири області горіння метану. Перша область — це область, в якій концентрація метану більша за критичну концентрацію. В цьому випадку велику роль грає запалювання метан. Друга область — це область в якій, горіння залежить від метану та вугільних частинок. Третя область — це область в якій концентрація метану та кисню не викликає загоряння системи. Четверта область — це область в якій концентрація метану недостатньо для запалювання, але концентрація вугільних частинок може викликати вибух [31].

В гібридних сумішах вугільна пил з високим вмістом летючих призводить до значного збільшення швидкості поширення полум'я. Це доводить, що частинки палива активно на процес горіння [35].

Також було виявлено, що на загоряння частинок суттєво впливає їх діаметр. При температурах менших за 1150 К зменшення діаметру приводить до зменшенню часу загоряння частинок. Якщо температура більша за 1150 К, то зменшення діаметру приводить до збільшення часу загоряння частинок [32].

1.10. Горіння фронту полум'я дисперсної суміші

Органічний склад вугільної пилі впливає на енергію руйнування молекули. В склад вугільної пилі, окрім золи може входити кисень повітря та водень. Сумарна енергія потрібна для того, щоб розділити компоненти вуглецю визначається по формулі.

$$U_{1\Pi} = 0,01 \cdot m_{\Pi} \cdot V_1 \cdot (U_{C\Pi} \cdot C + U_{H\Pi} \cdot H + U_{O\Pi} \cdot O_2)$$

де V_1 — об'ємна концентрація горючої речовини, m_{Π} — масова концентрація вугільної пилі в шахті, U — енергія розриву енергетичних зв'язків, C, H, O_2 — відповідна концентрація кожного елемента.

Сумарна кількість енергії при руйнуванні молекули метану дорівнює

$$U_{1M} = U_{HM} \cdot n_{1M}$$

де U_{HM} — середня енергія зв'язку атомів вуглецю з воднем. При екзотермічних реакціях вугільна частинка виділяє енергію

$$E_{1\Pi} = 0,01 \cdot m_{\Pi} \cdot V_1 \cdot (E_{H\Pi} \cdot H + E_{C\Pi} \cdot C)$$

де $E_{\text{нп}}$, $E_{\text{сп}}$ — теплота, яка виділяється продуктами реакції. Сумарна енергія, яка виділяється при екзотермічній реакції метану дорівнює:

$$E_{1\text{м}} = (E_{\text{с}} + E_{\text{н}}) \cdot n_{1\text{м}}$$

де $E_{\text{с}}$, $E_{\text{н}}$ — кількість теплоти, яка виділяється під час реакції вуглецю та водню. Сумарна енергія :

$$E = E_{1\text{м}} + E_{1\text{п}}$$

Отримана сумарна енергія передається на всі молекули повітря. В результаті цього збільшується кінетична енергія молекули, підвищення температури та тиску. Температура в об'ємі екзотермічної реакції визначається по формулі:

$$T = 48,1 \cdot E \cdot \frac{V_m}{V_1} K$$

де V_1 — початковий об'єм пального в шахті, V_m — молярний об'єм повітря в шахті. Процес розповсюдження хімічної реакції горіння на сусідні шари, які містять горючі речовини, починається після початку екзотермічної реакції в початковому об'ємі. Кількість енергії, яка виділяється на i -шарі, знаходиться по формулі

$$E_i = E_1 K^i \quad (1.7)$$

1.11. Висновки до розділу 1

Аналіз літературного огляду показав, що реакція горіння вугільної частинки являється не простим процесом та потребує складних математичних моделей. Процес горіння твердого пилоподібного палива вимагає ретельного вибору параметрів системи та умов середовища.

Пиловугільне паливо дозволяє контролювати параметри процесу. Наприклад, довжину факелу та його температуру.

Горіння залежить від типу вугілля, розмірів, вмісту домішок, вологості. Також, на загоряння впливає атмосфера суміші та концентрація.

Плюсом палива являється велике енерговиділення, низька ціна, легке видобування. Мінусом являється виділення парникових газів, наявність золи та вологи.

РОЗДІЛ 2.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГОРІННЯ ВУГІЛЬНИХ
ЧАСТИНОК

2.1. Моделювання процесів горіння

2.1.1. Основні рівняння балансу

Для опису процесу горіння достатньо знати рівняння Нав'є-Стокса і рівняння переносу енергії [7].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i Y_k}{\partial x_i} = \frac{\partial J_i^k}{\partial x_i} + \dot{m}_k$$

де, J_i^k — молекулярно дифузійний потік, який для ламінарної течії має наступний вигляд:

$$J_i^k = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i - D_{T,m} \frac{\nabla T}{T}$$

де, $D_{i,m}$ — коефіцієнт масової дифузії, $D_{T,m}$ — коефіцієнт теплової дифузії

Для турбулентної течії має наступний вигляд:

$$J_i^k = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{c_t t}} \right) \nabla Y_i - D_{T,m} \frac{\nabla T}{T}$$

де, $S_{c_t t}$ — турбулентне число Шмідта

За допомогою дифузійного рівняння можна знайти зміну масової концентрації реагентів та продуктів реакції в певний момент часу

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \nabla (\rho u_i Y_k) = -\nabla J_i^k + R_i + S_i$$

де, R_i — чиста швидкість утворення продуктів хімічної реакції, S_i — швидкість утворення продуктів хімічної реакції [9], [12].

2.1.2. k - ε модель

Найпростішим типом турбулентності є модель з двома рівняннями, в яких розв'язки дозволяють незалежно визначити масштаби швидкості. **k-epsilon** модель є напів-емпіричною моделлю, яка заснована на рівняннях кінетичної енергії турбулентності та швидкості його розсіювання. Також, вона є основою для всіх інженерних розрахунків, тому що її запропонували Ліндерман та Сполдінгом. Окрім цього, вона надійна, точна та потребує мінімальну кількість ресурсів. При розрахунках вважаємо, що потік повністю турбулентний, а вплив молекулярних в'язкостей незначний.

Кінетична енергія турбулентності k виражається формулою:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Z_M + S_k$$

Швидкість розсіювання визначається по формулі:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho k \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

де, G_k — кінетична енергія утворена за рахунок середнього градієнта швидкості, G_b — середня енергія утворена за рахунок плавучості, Z_M — внесок флуктуації до загальної швидкості, яка визначається по формулі:

$$Z_M = 2\rho \varepsilon M_t^2$$

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, σ_ε — константи, S_k , S_ε — початкові енергії, M_t — турбулентне число Маха. Турбулентна в'язкість визначається по формулі

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

де, C_ε — константа [8].

2.1.3. k - ω модель

Для розрахунку динамічної поведінки рідини існує k - ω турбулентна модель, яка використовує два диференціальних рівняння. Модель намагається спрогнозувати турбулентність за допомогою рівнянь, які містять дві змінні k та ω [2], [14]

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \rho P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\partial \rho k}{\partial x_j} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma \omega}{k} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \frac{\partial \rho \omega}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

для пошуку k та ω можна використати наближені формули, які дозволяють зменшити кількість ресурсів необхідних для розрахунку моделі. Швидкість розсіювання можна записати, як:

$$\omega_\omega = \frac{\rho u}{\mu} \min \left(\omega_\omega^+, \frac{6}{\beta_i (y^+)^2} \right)$$

2.2. Модель випромінення P-1

Модель P-1 є найпростішим випадком радіаційної моделі, яка базується на розширенні інтенсивності випромінення I . Потік енергії визначається по формулі:

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - \sigma_s} \nabla G \quad (2.1)$$

де, a — коефіцієнт поглинання, σ_s — коефіцієнт розсіювання, G — падаюче випромінювання, C — коефіцієнт лінійної-анізотропності. Введемо новий

параметр Γ :

$$\Gamma = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - \sigma_s}$$

Тоді формула (2.1) перепишеться, як:

$$q_r = -\Gamma \nabla G$$

Рівняння для G має вигляд:

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4an^2 \sigma T^4 = S_G \quad (2.2)$$

де, n — показник заломлення середовища, σ — константа Стефана-Больцмана, S_G — енергія, яка визначається в залежності від системи. Якщо у моделі знаходяться тверда фаза у вигляді дрібних частинок, тоді формула (2.2) матиме вигляд:

$$\nabla(\Gamma \nabla G) + 4\pi \left(an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p \right) - (a + a_p)G = 0$$

де, E_p — еквівалентне випромінювання частинок, a_p — еквівалентний коефіцієнт поглинання. Формула для E_p та a_p — має наступний вигляд:

$$E_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N \varepsilon_{pn} A_{pn} \frac{\sigma T_{pn}^4}{\pi V}$$

$$a_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N \varepsilon_{pn} \frac{A_{pn}}{V}$$

де, ε_{pn} — випромінювальна здатність, A_{pn} — площа поверхні частинок, T_{pn} — температура [5], [10].

2.3. Рівняння руху частинок

Рівняння руху частинок є основним механізмом за допомогою якого відбувається моделювання процесу горіння в турбулентному потоці. Він дозволяє спрогнозувати положення частинки в певний момент часу за допомогою рівняння силового балансу, яка має наступний вигляд:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x$$

де, F_x — додаткова сила, яка створює прискорення рідини, що оточує частинку. Вона визначається по формулі:

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt}(u - u_p)$$

$F_D(u - u_p)$ — сила опору на частинку, яка знаходиться по формулі:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}$$

де, u — швидкість газоподібної фази, u_p — швидкість частинок, ρ — щільність газу, ρ_p — щільність частинок, d_p — діаметр частинок [3].

2.4. Горіння поверхні частинки

Під час нагрівання частинки твердого палива відбувається процес газифікації, яка проходить до того моменту поки летюча маса не перетвориться на газ. Після цього відбувається горіння поверхні твердого палива, яка описується співвідношенням:

$$char(s) + S_b ox(g) = products(g)$$

де, S_b — стехіометричний коефіцієнт реакції.

Всього існує чотири гетерогенні моделі горіння частинок: модель обмеженої дифузії, модель кінетики/дифузії з обмеженою швидкістю, внутрішня модель, модель поверхневих реакцій.

Модель обмеженої дифузії припускає, що реакція протікає зі швидкістю, що визначається дифузією газоподібного окислювача до поверхні частинки, яка знаходиться по формулі:

$$\frac{dm_p}{dt} = -4\pi d_p D_{i,m} \frac{Y_{OX} T_\infty \rho}{S_b(T_p) - T_\infty}$$

де, $D_{i,m}$ — коефіцієнт дифузії, Y_{ox} — концентрація окислювача, T_p — температура частинки, T_∞ — температура середовища. В даній моделі припускається, що діаметр частинок не змінюється. Унаслідок цього у частинці виникає пориста структура.

Модель кінетики/дифузії з обмеженою швидкістю припускає, що швидкість реакції визначається кінетикою та дифузією, яка описується по формулі:

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{OX} \frac{D_o R}{D_0 + R} \quad (2.3)$$

де, A_p — площа поверхні частинки, p_{ox} — парціальний тиск окислювача в газі, R — кінетична швидкість, яка знаходиться по формулі:

$$R = C_2 E^{-\frac{E}{RT_p}}$$

де, C_2 — константа, D_0 — дифузійна швидкість, яка знаходиться по формулі

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0,75}}{d_p}$$

де, C_1 — константа. У цій моделі розміри частинок залишаються постійними.

У внутрішній моделі порядок реакції дорівнює одиниці. Вона використовує рівняння (2.3), але швидкість R — виражається, як:

$$R = \eta \frac{d_p}{6} \rho A_g k_i$$

де, η — коефіцієнт ефективності, який визначається, як:

$$\eta = \frac{3}{\varphi^2}(\varphi \coth(\varphi) - 1)$$

де, φ — модуль Тіле:

$$\varphi = \frac{d_p}{2} \left[\frac{S_b \rho_p A_g k_i \rho}{\omega_e \rho} \right]^{\frac{1}{2}}$$

де, ω_e — ефективний коефіцієнт дифузії, k_i — внутрішня реактивність, яка визначається по формулі:

$$k_i = A_i e^{-\frac{E_i}{RT_p}}$$

Модель поверхневих реакцій вважає, що поверхня вугільної частинки представляє собою шари однакової товщини, які поступово запалюються та згорають. Під час процесу горіння на поверхні частинки можуть проходити декілька реакцій. Також, дана модель працює з газо-твердими реакціями [4] [11].

2.5. Механізми газифікації вугільного палива

Газифікація вугільного палива може проходити за допомогою одноступеневого або двоступеневого механізмів.

Будемо вважати, що концентрація масової частки фіксованого вуглецю, летких, зали та волого є сталою. Також, їхнє відсоткове співвідношення повинне дорівнювати 100 %.

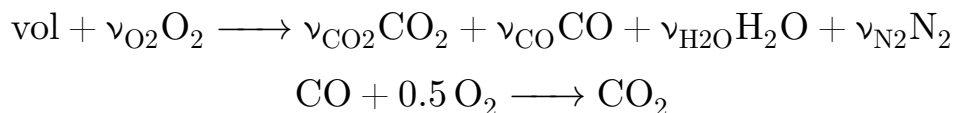
Повинна бути обов'язково наявність С, Н, О, N, щоб їх масова концентрація у відсотках дорівнювала 100 %.

Одноступеневий механізм є найпростішим випадком газифікації вугілля. Він знаходиться за рівнянням.



де, ν_{O_2} , ν_{CO_2} — $\nu_{\text{H}_2\text{O}}$ — стехіометричні коефіцієнти.

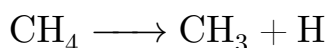
Двоступінчастий механізм включає окислення летких речовин до CO в першій реакції і окислення CO до CO₂ у другій реакції [1]:



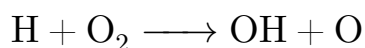
2.6. Механізм горіння метану

Розглянемо механізм горіння, який є найбільш характерним при високих температурах.

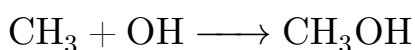
За наявності кисню метан легко віддає атом водню. Внаслідок цього утворюється радикал CH₃.



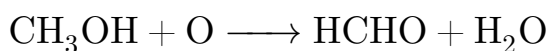
Атомарний водень взаємодіє з молекулою кисню утворюючи гідрооксидом.



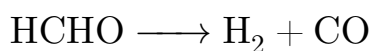
Далі відбувається реакція взаємодії радикала CH₃ з OH при цьому метиловий спирт.



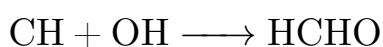
Після взаємодії групи CH з гідрооксидом отримаємо стабільні молекули CO і H₂



Утворений формальдегід розкладається на стійкі H₂ і CO.



Також, формальдегід виникає при



Утворенні H₂ і CO згорять утворюючи нові продукти.

З вище наведених рівнянь можна зробити висновок, що окрім окислення відбувається термічний розклад. Під час розкладу важкий вуглець утворює зжятий карбон [22].

2.7. Розподіл частинок по їх діаметру

Під час подрібнення вугільного палива можуть утворитися частинки різного діаметру, які суттєво впливають на процес горіння. Це пов'язано з тим, що частинки подаються на вхідне сопло реактора з хаотичним розподілом по діаметру. Внаслідок цього можуть виникнути нерівномірні поля енерговиділення, що викликає збільшення хімічного недопалу. Для усунення цієї проблеми було відкрито метод (Розіна-Раммлера) за допомогою якого можна спрогнозувати розподіл частинок. Даний метод виражається функцією:

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad (2.4)$$

де, $\bar{d}$ — середній діаметр, n — параметр розподілу. Формула (2.4) для кожного діаметру частинки визначає її розподіл [6], [7].

2.8. Верифікація горіння вугільного палива

Було проведено верифікацію горіння вугільного палива за допомогою програмного комплексу ANSYS Fluent. В якості турбулентної моделі було використано $k - \varepsilon$ модель. В якості радіаційної моделі застосовано P-1 модель. Реакція горіння частинок відбувається по одно-кроковому механізму. Метан та інші гази відсутні [14].

Реактор представляє собою циліндричну трубу на вхід, якої подається повітря, а посередині подаються вугільні частинки рис. 2.1. Температурні поля зображено на малюнку рис. 2.2. На рис. 2.3 зображено масову фракцію H_2O . На рис. 2.4 зображено масову фракцію CO_2 .

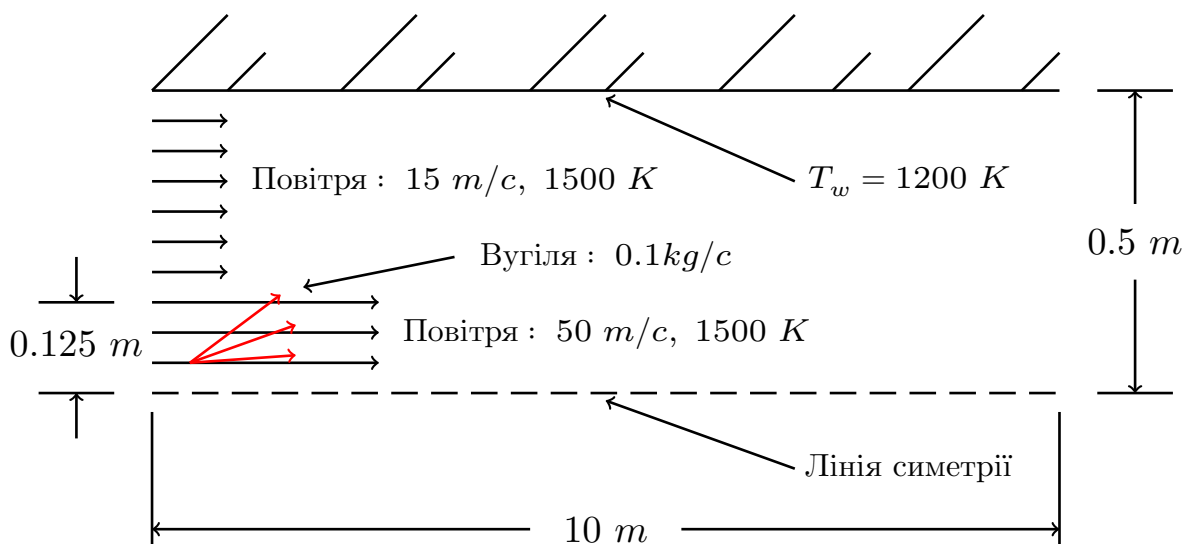


Рис. 2.1. Схема реактора та його граничні умови

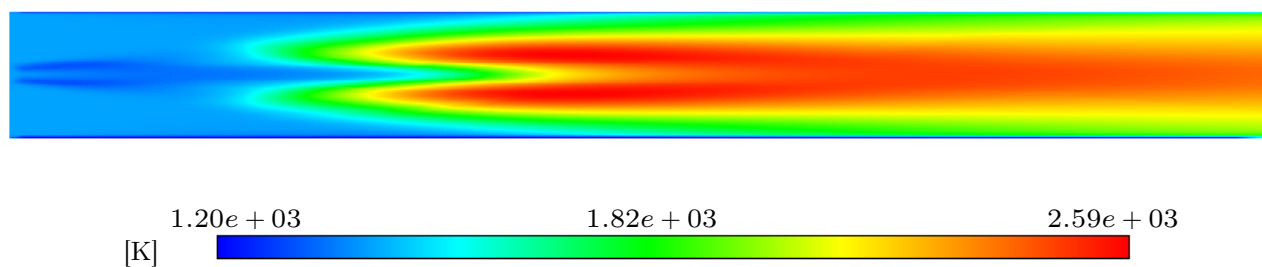
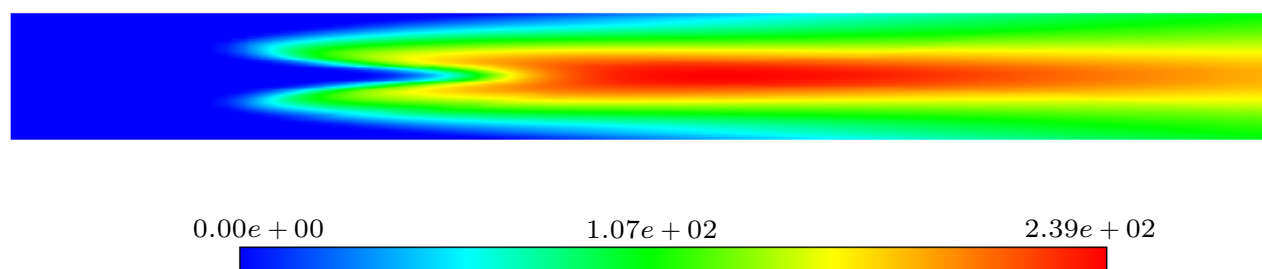
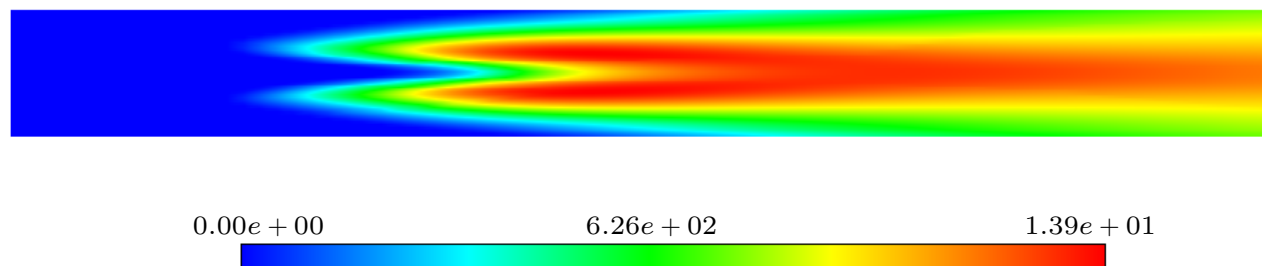


Рис. 2.2. Розподіл температурного поля в середині реактора

Рис. 2.3. Розподіл масової фракції H_2O в середині реактораРис. 2.4. Розподіл масової фракції CO_2 в середині реактора

Емісія не згоріло карбону складає на вході $6.777 \cdot 10^5$ кг/с, а на виході $6.781 \cdot 10^9$ кг/с. Використання радіаційної моделі зменшує температуру реактора рис. 2.5.

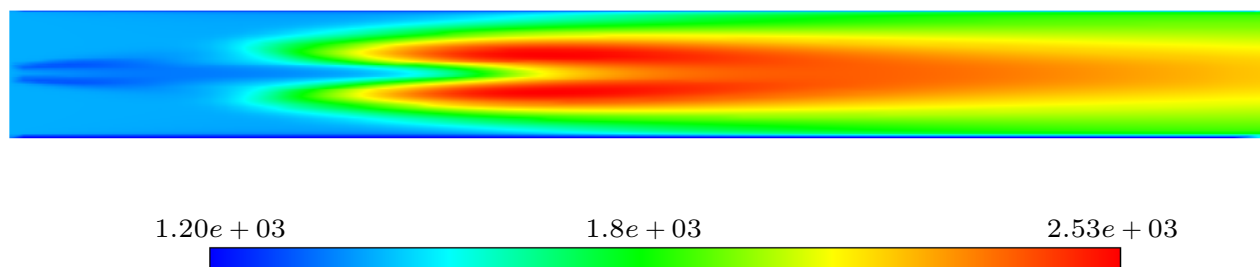


Рис. 2.5. Розподіл температурного поля в середині реактора

2.9. Геометрична 2D-модель

В якості об'єкту дослідження використовується **Controlled Profile Reactor (CPR)** рис. 2.6, який був розглянутий у роботах [6], [7]. Він представляє собою циліндричний ректор потужністю 0,5 МВт з внутрішнім діаметром 80 см і довжиною 240 см.

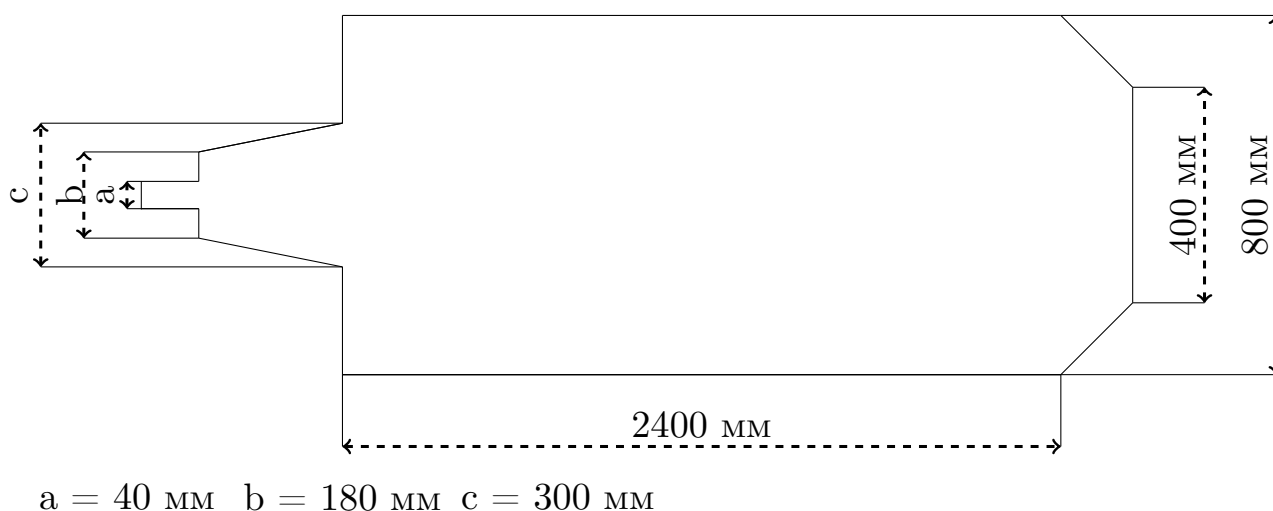


Рис. 2.6. Модель CPR [6], [7]

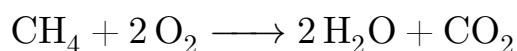
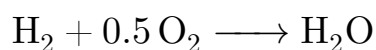
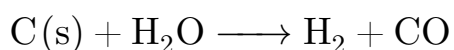
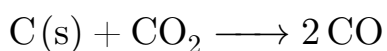
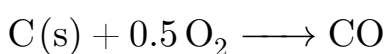
На вхід подається повітря, а через мале сопло вугільні частинки, які змішуючись з окислювачем утворюють суміш, яка загоряється. Через отвір з протилежного боку виходять продукти згорання.

Моделювання процесу горіння виконувалося за допомогою студентської версії програми ANSYS FLUENT 19.2. Геометрія була побудована у SCMD 19.2.

Для побудови фізики процесу було використано методи, які дозволять правильно змодельовати горіння вугільних частинок в потоці.

Метод **Energy** дозволяє використовувати енергетичні рівняння. Метод **Viscous Model** дає можливість вибирати фізичні параметри ламінарної та турбулентної течії. Було застосовано **k-epsilon** модель, яка включає в'язке нагрівання та вплив плавучості на ϵ . Для створення радіаційного випромінювання було використано **P1 Model**, яка дозволяє рівномірно по всій області випромінювання розподіляти радіаційну енергію. Метод **Species Transport** дозволяє досліджувати систему, яка складається з двох або більше компонентів, які переміщуються між собою. Також, даний метод включає **Volumetric** реакції, які відбуваються в об'ємі та **Particle surfaces**, яка проходить на поверхні вугільної частинки. В якості. Метод **finite-rate/eddy-dissipation** дозволяє описати імовірність знаходження речовини в розрахунковій області. Метод **Discreate Phase** дає можливість подавати у розрахункову область суміш вугільних частинок. В даній моделі вона інжектується на вхід реактора з початковою швидкістю, яка дорівнює швидкості повітря.

Дана модель використовує двоступеневий механізм газифікації. Стехіометричні коефіцієнти для даного механізму знаходяться за допомогою діалогового вікна **Coal Calculator**. Для твердої фази були застосовані наступні хімічні реакції:



Метод **Material** дозволяє визначити тип та характеристики матеріалів, які знаходяться у розрахунковій області. Метод **Bondary Conditions** — дозволяє встановити граничні умови на стінках.

Розрахункова сітка зображена на рис. 2.7. Вона володіє однаковою густиною на всій області. Її параметри представлено в таблиці 2.1. Використовувався трикутниковий методи для побудови геометрії комірок. Розміри вузлів 1,5 см.

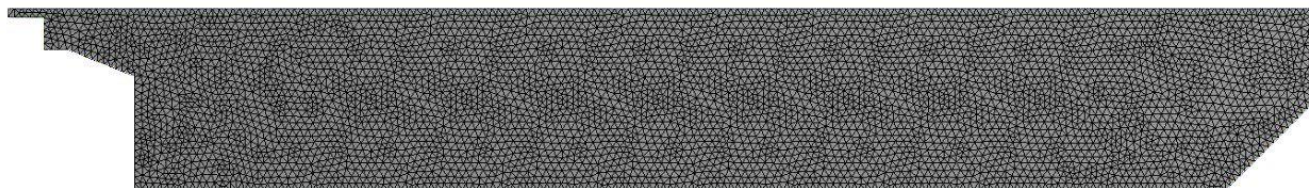


Рис. 2.7. Розрахункова сітка

Таблиця 2.1

Параметри розрахункової сітки

Кількість вузлів	4946
Кількість елементів	9464

2.10. Вхідні параметри моделі

Основною величиною відносно, якої відбувається визначення вхідних параметрів моделі є потужність. В даній роботі вона складає 0,5 МВт. Цей параметр дозволяє знайти витрату вугільних частинок. Для цього потрібно знати теплоту згоряння палива, яка розраховується за формулою:

$$Q_H^P = 339 \cdot C^P + 1256 \cdot H^P - 109(O^P - S_L^P) - 25,14 \cdot (9 \cdot H^P + W^P) = 35 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

де C^P — масова концентрація карбону, яка складає 97 %, H^P — концентрація водню, яка складає 1 %, O^P — масова концентрація кисню, яка складає 1 %, S_L^P — масова концентрація сірки, яка складає 0 %, W^P — масова концентрація води, яка складає 10 %. Також, потрібно додати, що масова частка леткої

частини вугілля становить — 50 %, а для фіксованого карбону — 50 %. Окрім рідкої фази у вугіллі присутня зола концентрацією 10 мас. %. Витрата палива складає:

$$G_C = \frac{P}{Q_H^P} = \frac{0,5 \text{ МВт}}{35 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}} = 0,0143 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Витрата повітря на один кілограм палива знаходиться по формулі:

$$L_{\Pi} = 2,66 \cdot \frac{C^P}{100} + 7,94 \cdot H^P 100 - \frac{O^P}{100} = 2,7$$

Тоді витрата повітря у нашому випадку складає:

$$G_{\Pi} = \alpha \cdot G_C \cdot L_{O_2} = 0,055 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

де α дорівнює 1,15. Повітря буде подаватися з температурою 673 К.

Швидкість повітря на вході у сопло визначається по формулою:

$$v = \frac{G_{O_2}}{\pi \rho R^2} = 4,33 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

де R — радіус вхідного сопла, яка складає 0,09 м, ρ — густина повітря при температурі 673 К, яка складає $0,504 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Температура на стінках у початковий момент часу складає 673 К.

Для дослідження впливу метану на процес згоряння частинок вугілля різного діаметру було проведено дослідження з 1 — 6 мас. % метану від теплової потужності реактора.

Знайдемо вхідні параметри для метанової суміші. Вважатимемо, що загальна потужність реактора не міняється. Це означає, що при додаванні метану потрібно зменшити витрату вугільного палива таким чином, щоб загальна потужність їхнього горіння складала 0,5 МВт.

Початкова потужність горіння для 0,25 % метану складає 8.7 кВт рис. 2.8, а питома теплота дорівнює $50 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$, тоді витрата палива визначається за формулою:

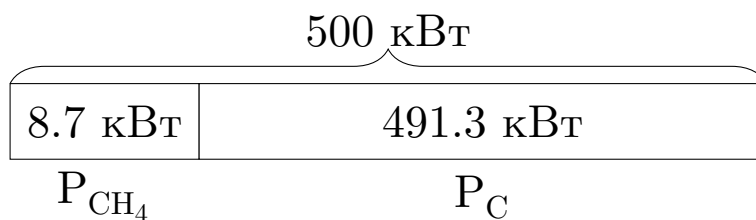
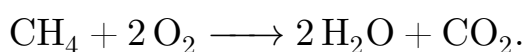


Рис. 2.8. Розподіл потужності для метаноповітряної суміші з початковою концентрацією CH_4 0,25 %

$$G_{\text{CH}_4} = \frac{P_{\text{CH}_4}}{\lambda_{\text{CH}_4}} = 0,000174 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (2.5)$$

Витрата повітря знаходиться за допомогою хімічного рівняння горіння метану:



З нього випливає:

$$G_{\text{II}} = 2 \cdot G_{\text{CH}_4} \cdot \frac{M_{\text{O}_2}}{0,23 \cdot M_{\text{CH}_4}} = 0,00302 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Витрата вугільного палива для метаноповітряного випадку складає:

$$G_C = \frac{P}{Q_H^P} = \frac{0,5 \text{ МВт}}{35 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}} = 0,014 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Витрата повітря для вугільного палива у метаноповітряному випадку складає:

$$G_{\text{II}} = \alpha \cdot G_C \cdot L_{\text{O}_2} = 0,0546 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Загальна витрата повітря складає:

$$G_{\text{II}} = 0,00302 \frac{\text{кг}}{\text{с}} + 0,0546 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 0,0576 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Загальна витрата повітря для метаноповітряної суміші складає:

$$v = \frac{G_{\Pi}}{\pi \rho R^2} = 4,49 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2.11. Висновки до розділу 2

У даному розділі було проведено пошук початкових граничних умов для комп'ютерної моделі. Було вибрано та описано фізичні методи за допомогою, яких побудовано фізику горіння.

При спалюванні вугільного палива можлива зміна діаметру частинок. Також, можлива зміна концентрації метану у метаноповітряній суміші.

Початкові граничні умови суттєво впливають на поведінку. Також, велику роль відіграють фізичні методи, які були застосовані в моделюванні.

Результати верифікації співпадають з даними описаними у статті. Тобто дану модель можна використати для побудови процесу горіння палива у проточному реакторі.

РОЗДІЛ 3.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1. Горіння вугільного пилу в повітрі

Було змодельовано процес горіння вугільних частинок діаметрами 35 – 60 мк з кроком 1 мк в повітрі. Для кожного розрахунку приймалося, що частинки мають однаковий діаметр.

Втрати теплоти при хімічному недопалі характеризуються величиною:

$$q = \frac{Q_{\text{ХН}}}{Q},$$

де Q — теплота, що виділяється при повному згорянні палива, $Q_{\text{ХН}}$ — теплота, що виділяється при згорянні коксового залишку та СО.

Результати обчислення показали, що втрати теплоти при хімічному недопалі зростають зі збільшенням діаметру частинок палива (рис. 3.1).

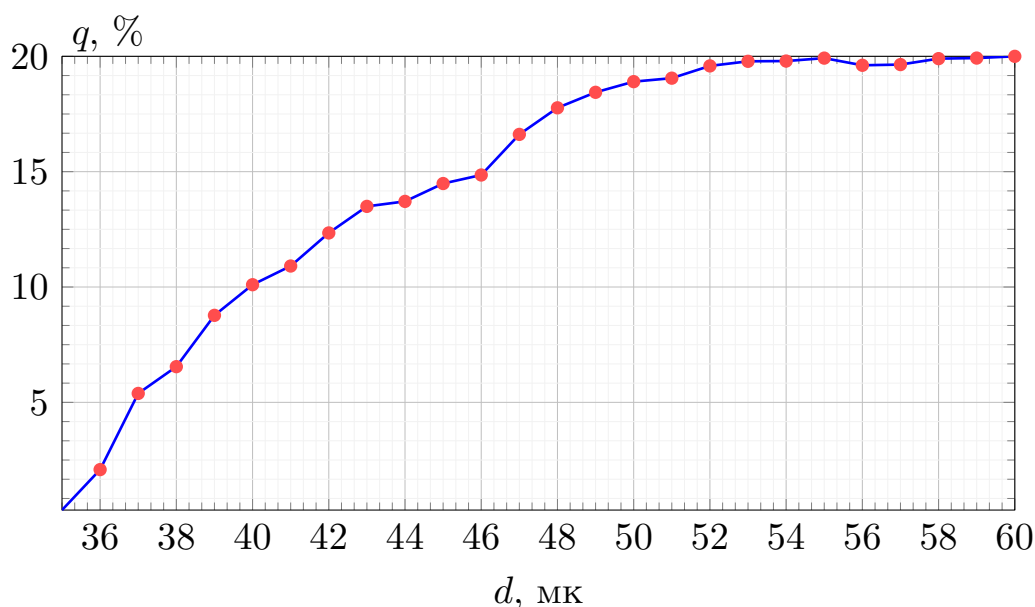


Рис. 3.1. Графік залежності втрати теплоти при хімічному недопалі від діаметру частинок

Максимальна температура моделі падає при збільшенні діаметру частинок (рис. 3.2) внаслідок збільшення хімічного недопалу.

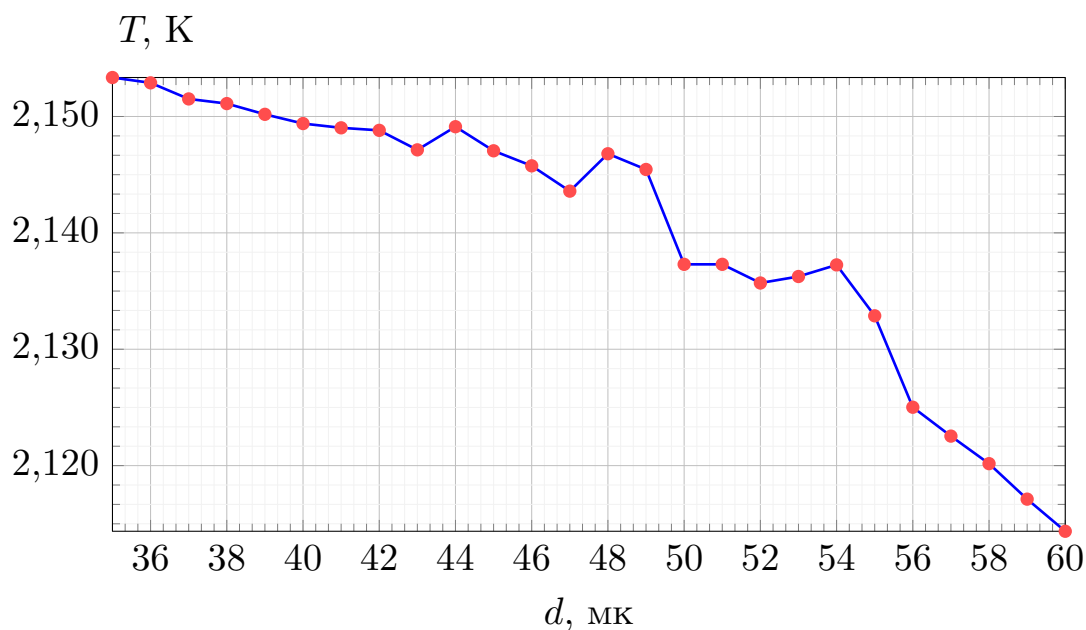


Рис. 3.2. Графік залежності максимальної температури від діаметру частинок. Емісія CO на виході з реактору зменшується при збільшенні діаметру частинки (рис. 3.3).

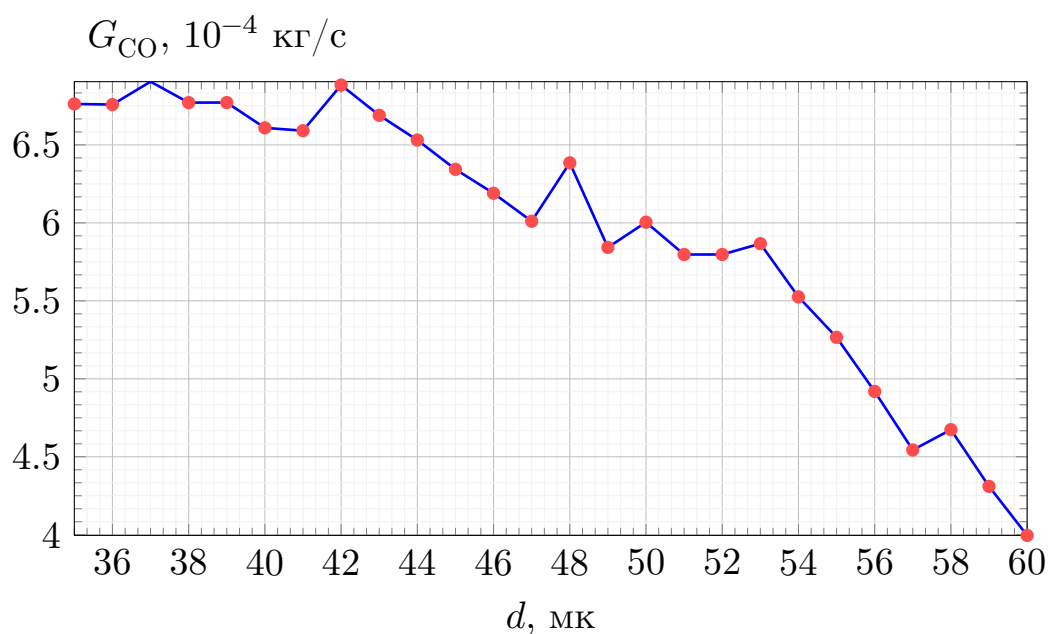
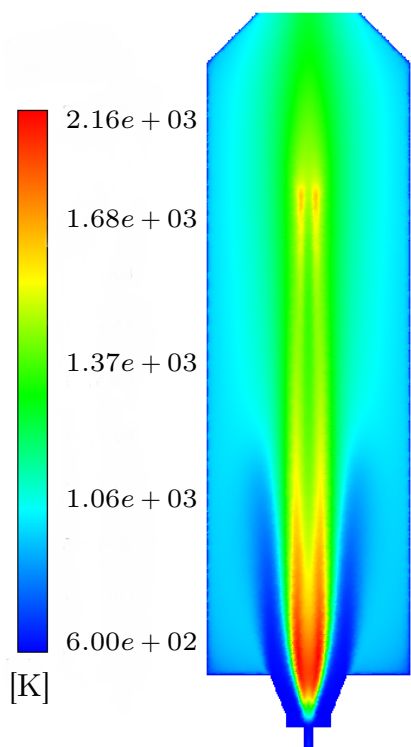
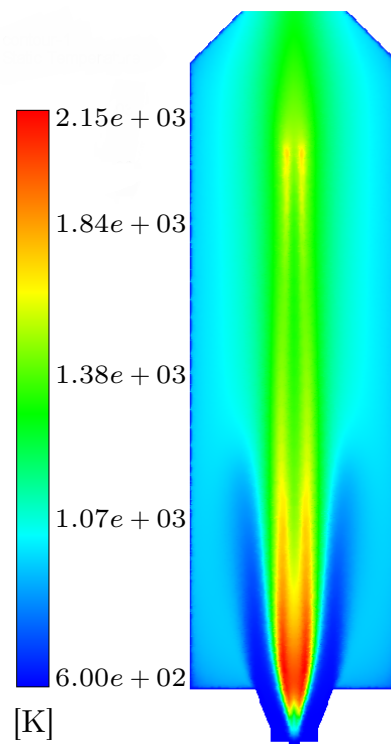


Рис. 3.3. Графік залежності емісії CO на виході від діаметру частинок.

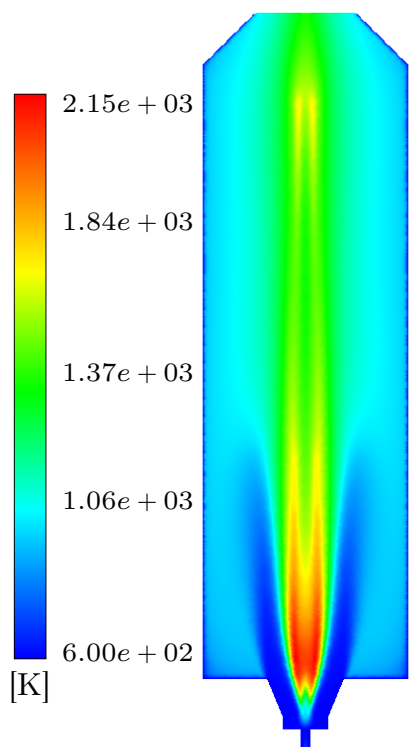
На рис. 3.4, 3.5 показано, як діаметр частинок впливає на температурне поле в середині реактора.



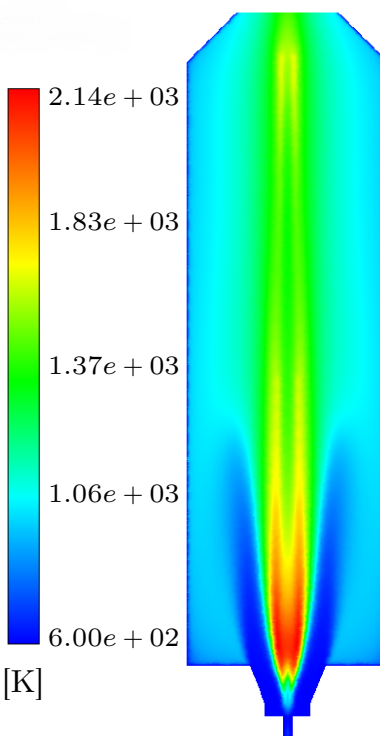
35 мк



40 мк



45 мк



50 мк

Рис. 3.4. Температурні поля для частинок діаметром 35 — 50 мк

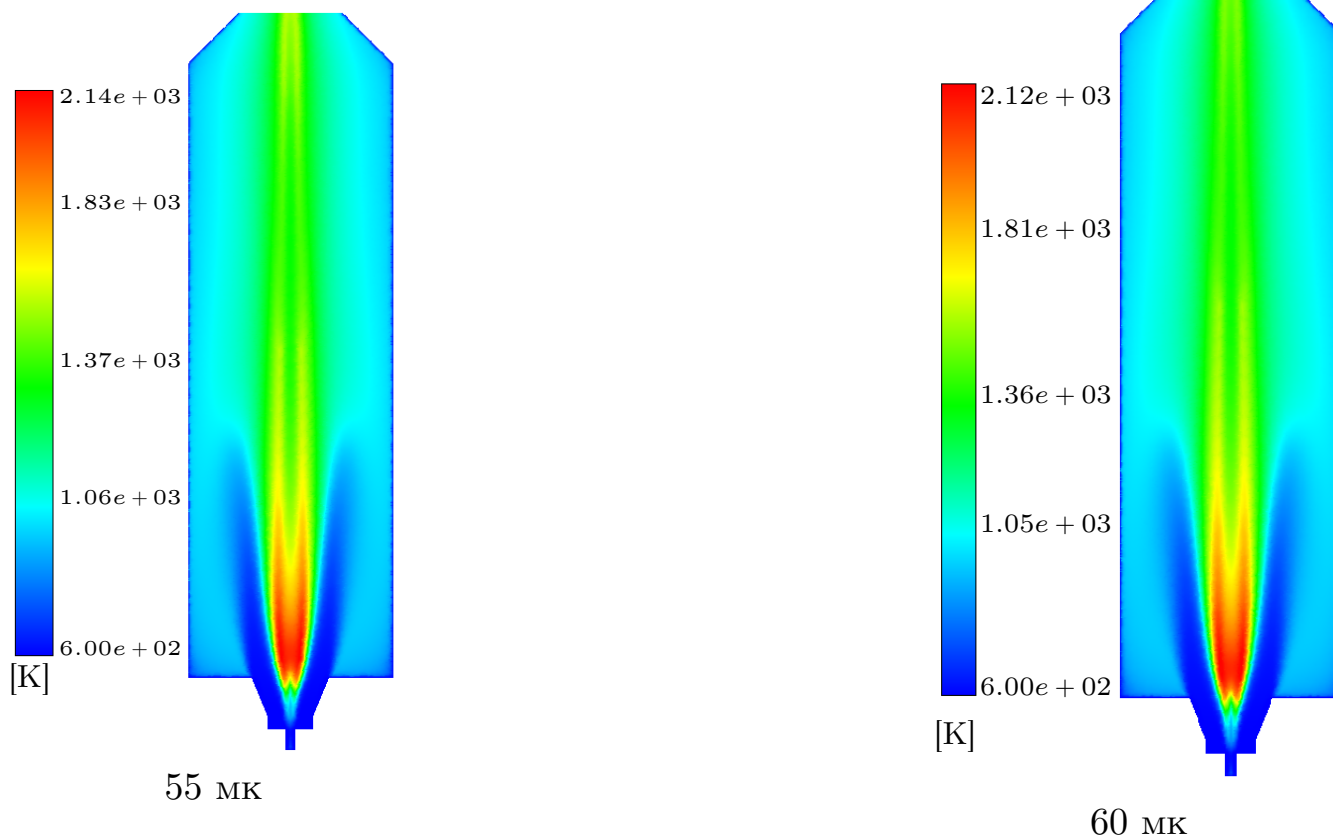


Рис. 3.5. Температурні поля для частинок діаметром 55 — 60 мк

На рис. 3.6 показано, як діаметр частинок впливає на розподіл температури вздовж осі реактора.

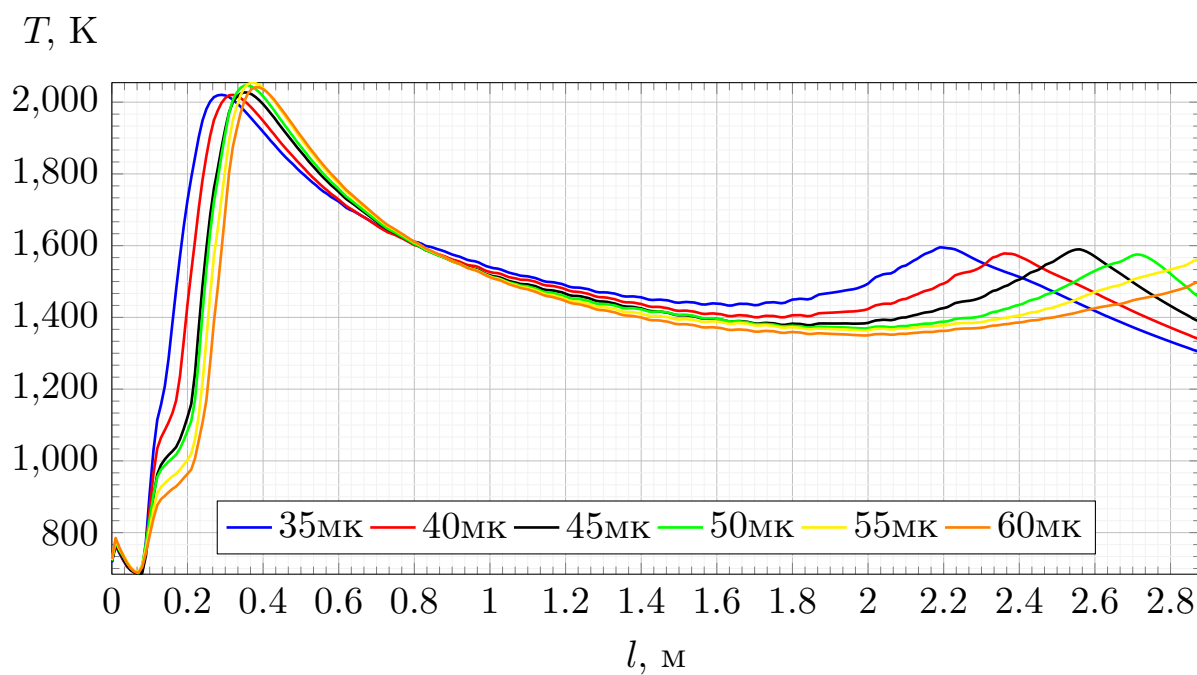


Рис. 3.6. Розподіл температури вздовж осі реактора

3.2. Горіння вугільного пилу в реакторі більшої висоти

Для зменшення хімічного недопалу потрібно збільшити час руху вугільної частинки в середині реактора. Це можливо, якщо збільшити висоту робочої області за умови постійної площі поперечного перерізу.

Висота ректора збільшена на 0,5 м, тобто вона дорівнює 2,9 м. Початкові граничні умови для температури та швидкості не змінюються.

Результати моделювання показали, що втрати теплоти при хімічному недопалі зростають при збільшенні діаметру (рис. 3.7). Частинки повністю згорають при діаметрах 35 — 60 мк. Максимальні втрати теплоти у два рази менші, якщо порівнювати з максимальними втратами на рис. 3.1.

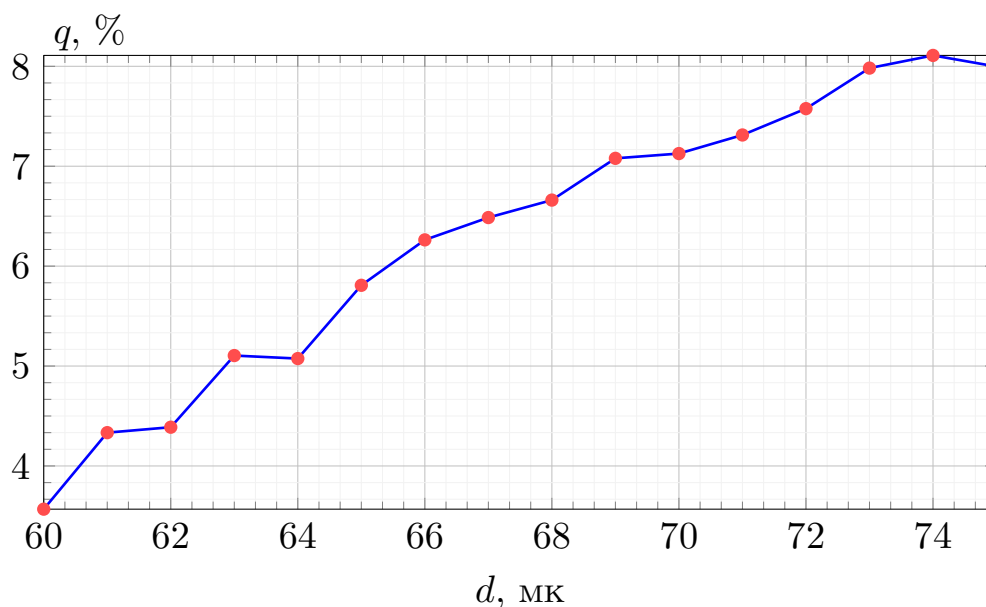


Рис. 3.7. Графік залежності втрати теплоти при хімічному недопалі від діаметру частинок

Максимальна температура моделі падає при збільшенні діаметру частинок (рис. 3.8) внаслідок збільшення хімічного недопалу. Температура менша у порівнянні з температурами у моделі на рис. 3.2.

Емісія CO на виході з реактору зменшується при збільшенні діаметру частинки (рис. 3.9). Емісія CO набагато менша у порівнянні з рис. 3.3.

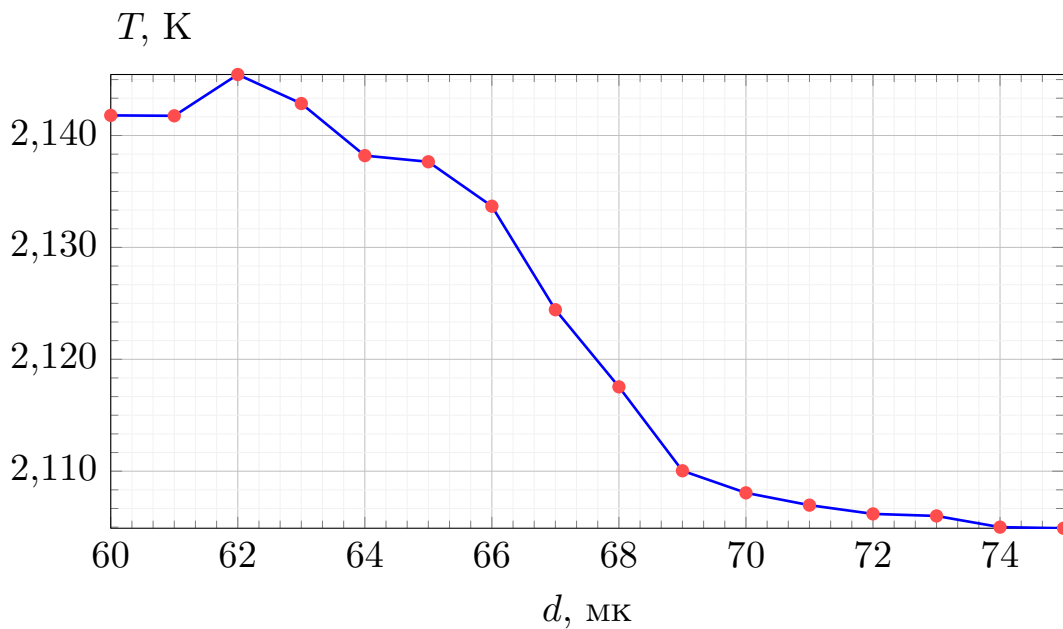


Рис. 3.8. Графік залежності максимальної температури від діаметру частинок

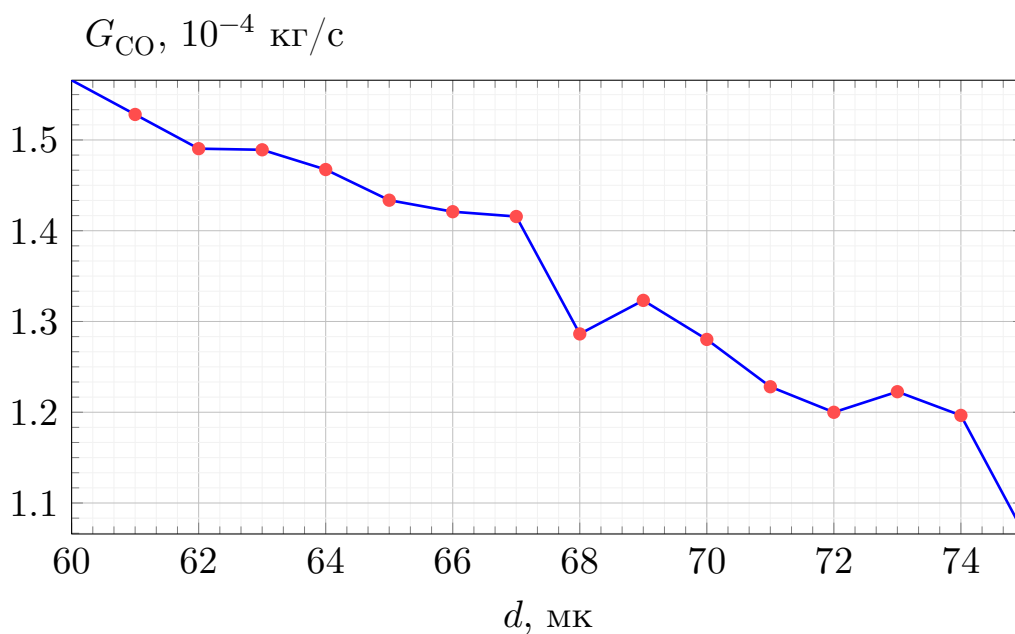


Рис. 3.9. Графік залежності емісії СО на виході від діаметру частинок

На рис. 3.10 показано, як діаметр частинок впливає на температурне поле в середині реактора.

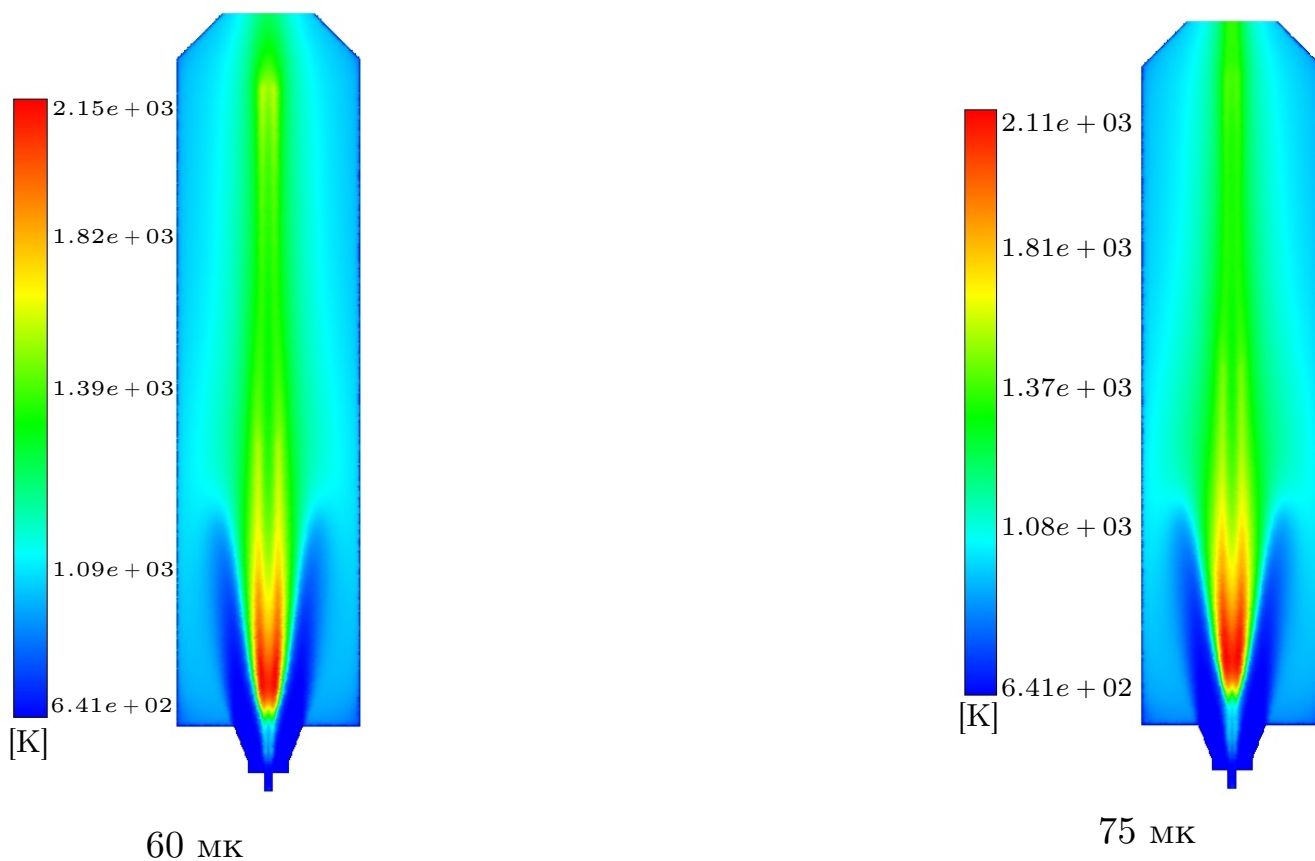


Рис. 3.10. Температурні поля при різних значеннях діаметру

На рис. 3.11 показано, як діаметр частинок впливає на розподіл температури вздовж осі реактора.

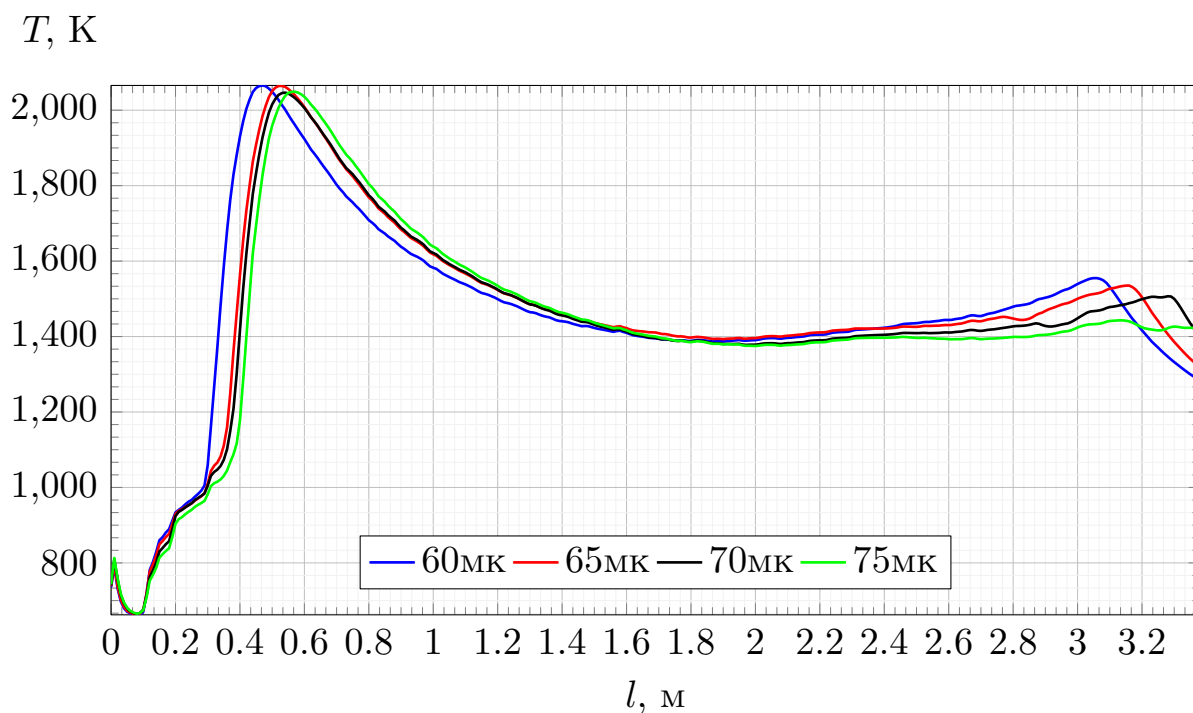


Рис. 3.11. Розподіл температур вздовж осі реактора з більшою висотою

3.3. Горіння вугільного пилу в метаноповітряній суміші

Для зменшення хімічного недопалу, на вхід у сопло реактора подають метаноповітряну суміш. Також, метан потрібно подавати у такій концентрації, щоб потужність реактора не збільшувалась. Це досягається шляхом зменшення маси вугільного пилу.

Було проведено порівняння втрат теплоти при хімічному недопалі для повітряної (0 % CH_4) та метаноповітряних сумішей рис. 3.12.

На рис. 3.13 зображена залежність втрати теплоти при хімічному недопалі під час горіння частинок вугілля діаметром 45 – 60 мк в метаноповітряній суміші. З рисунку видно, що використання метану зменшує хімічний недопал, а отже, підвищує коефіцієнт корисної дії та ефективність установки.

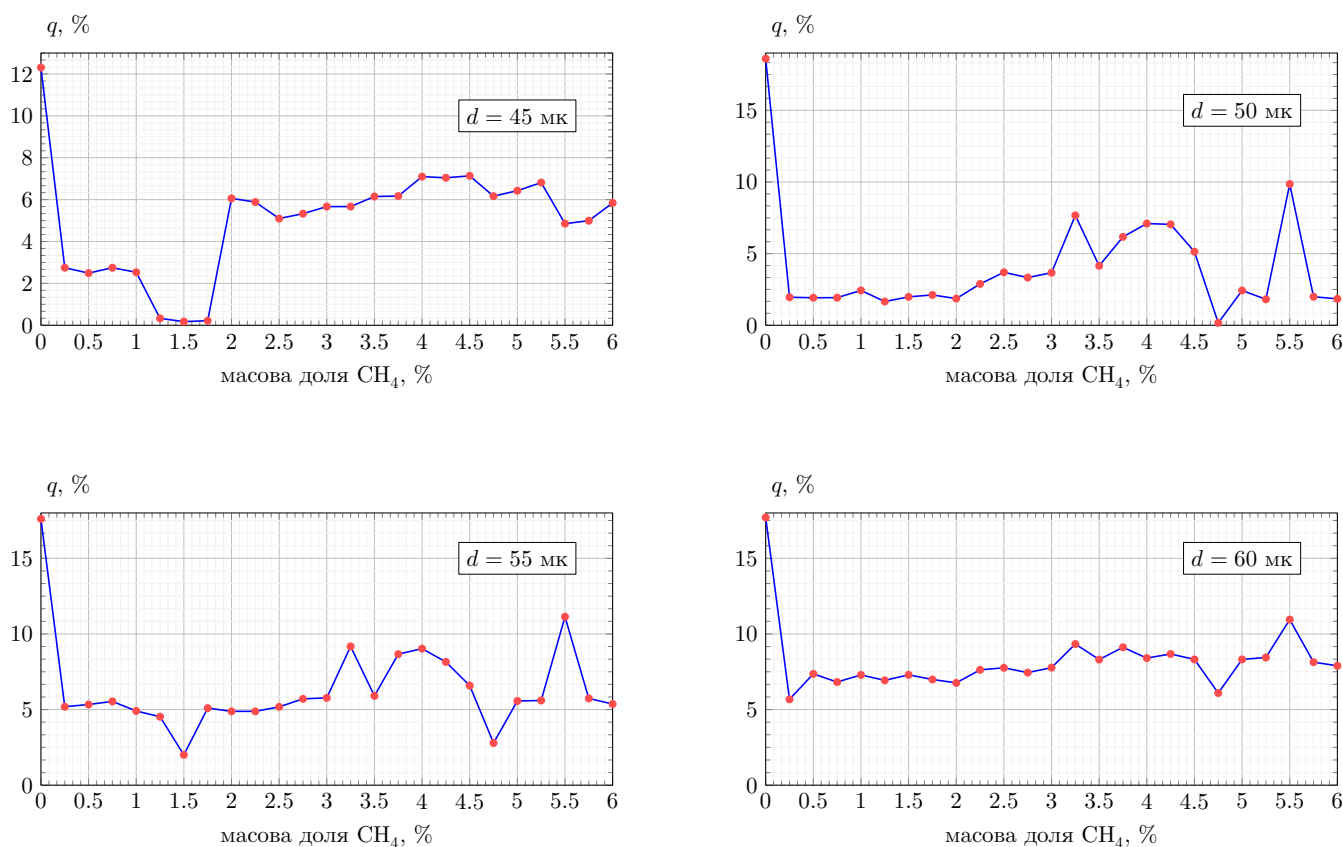


Рис. 3.12. Графік залежності втрати теплоти при хімічному недопалі від концентрації метану

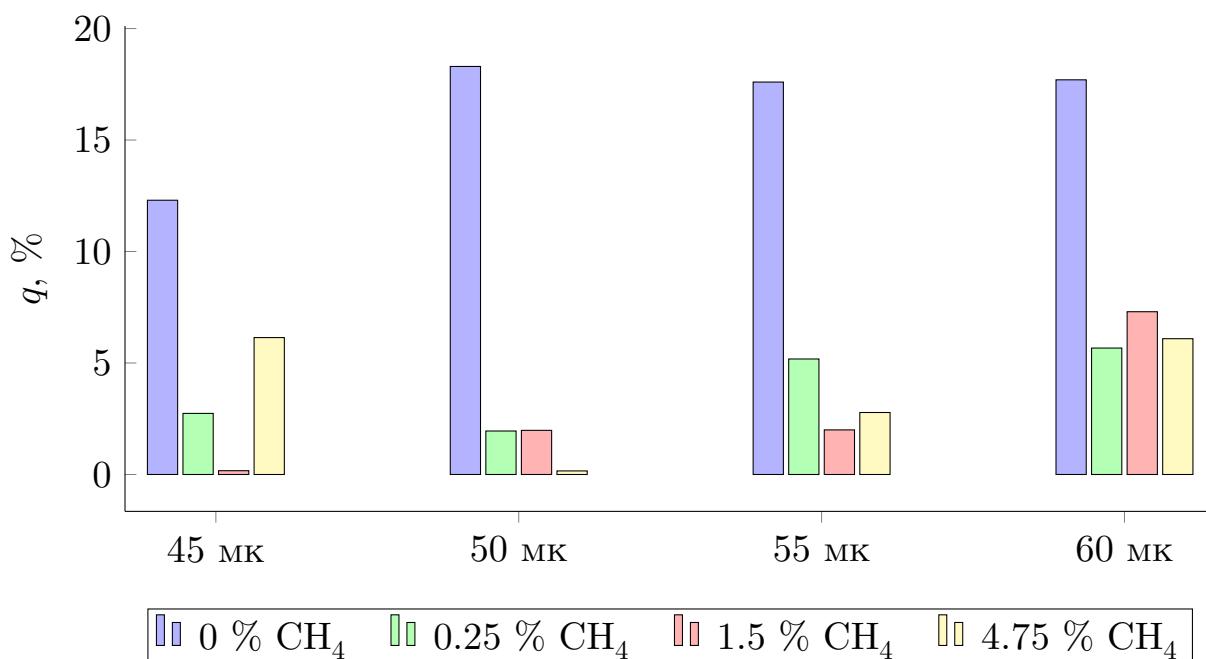


Рис. 3.13. Порівняння досліджуваних величин при різних значеннях концентрації метану

На рис. 3.14 показано, як діаметр частинок впливає на температурне поле в середині реактора при концентрації 1,5 % CH₄.

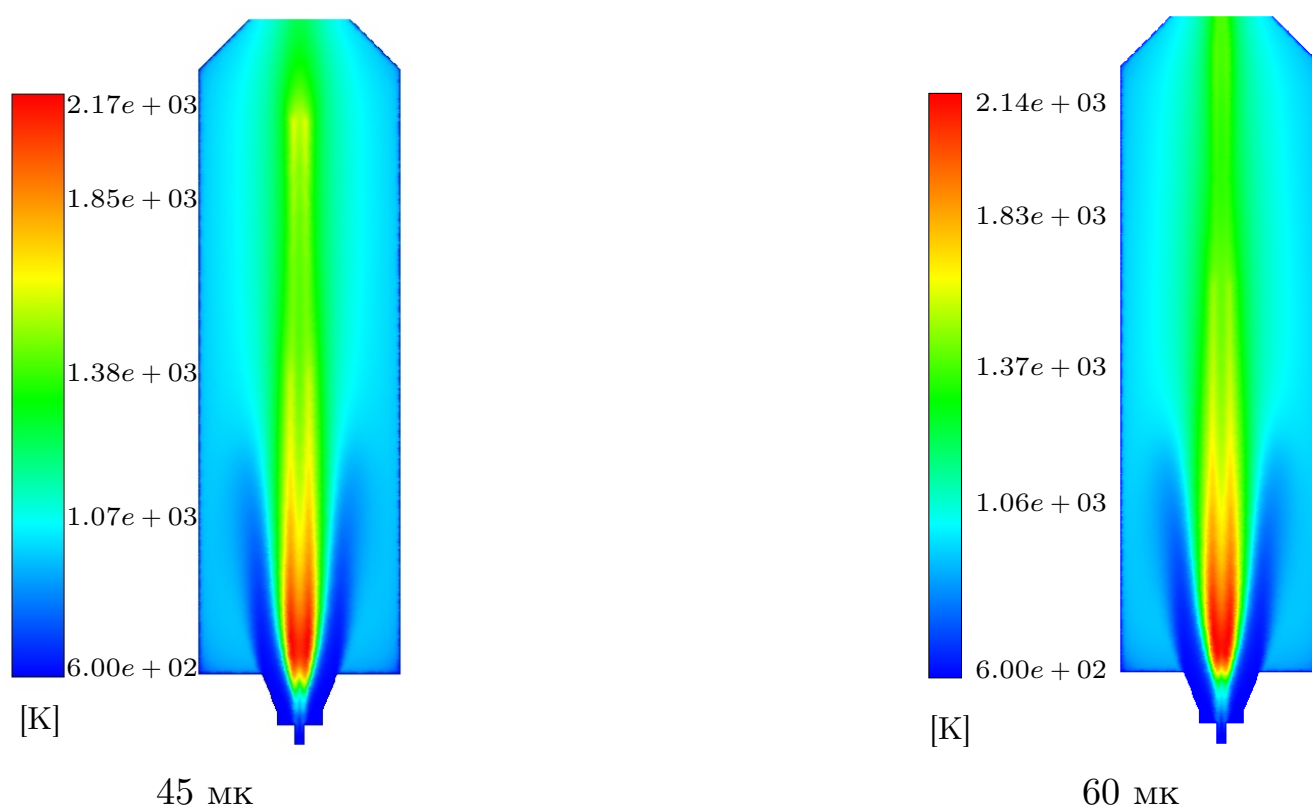


Рис. 3.14. Температурні поля при різних значеннях діаметру для концентрації 1,5 % CH₄

На рис. 3.15 показано, як діаметр частинок впливає на розподіл температури в з вздовж осі реактора.

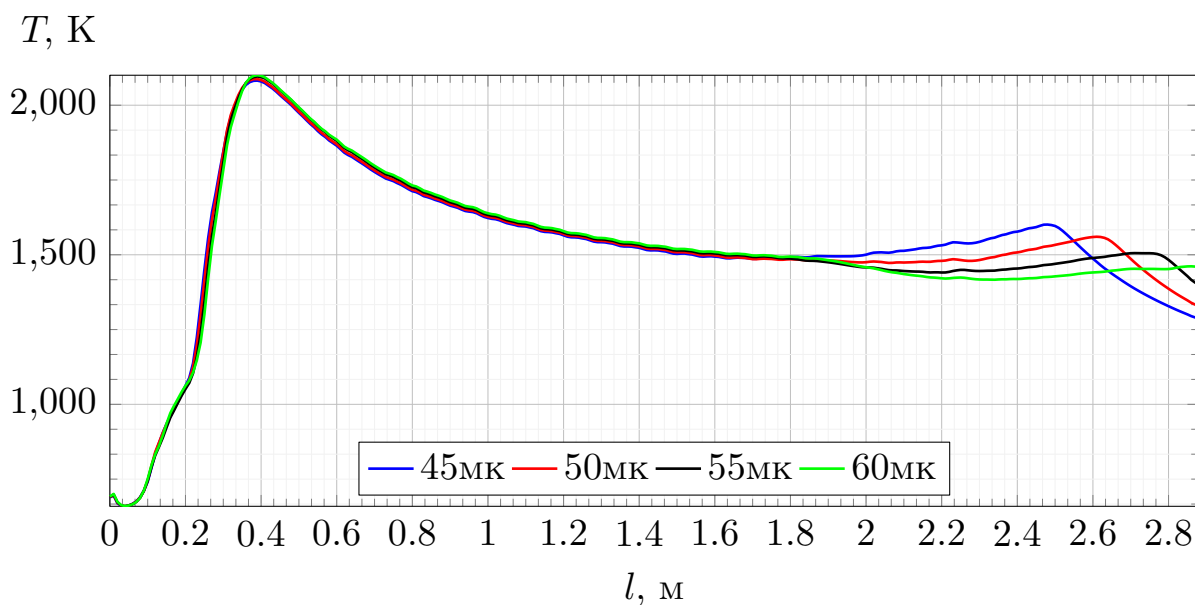


Рис. 3.15. Розподіл температури вздовж осі реактора для CH_4 1,5 %
Емісія CO для концентрацій CH_4 0, 0.25, 1.5, 4.75 % на виході з реактору зменшується при збільшенні діаметру частинки (рис. 3.16).

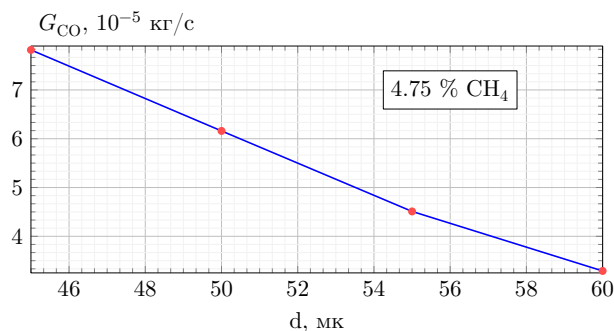
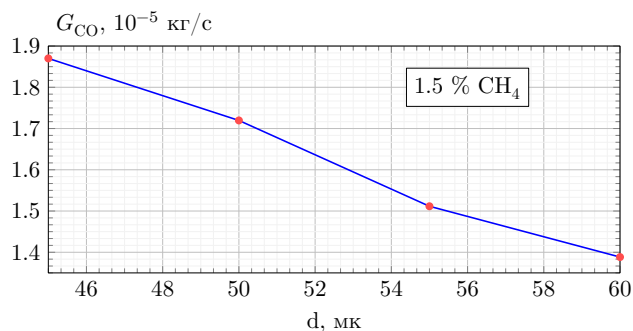
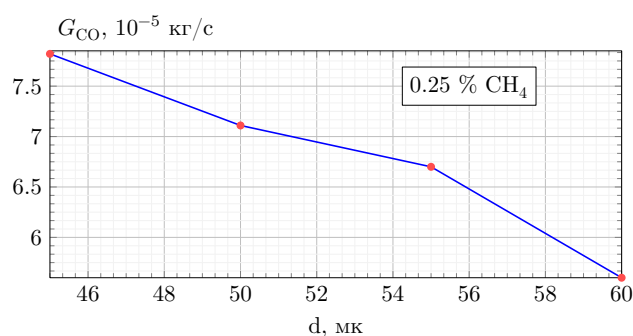
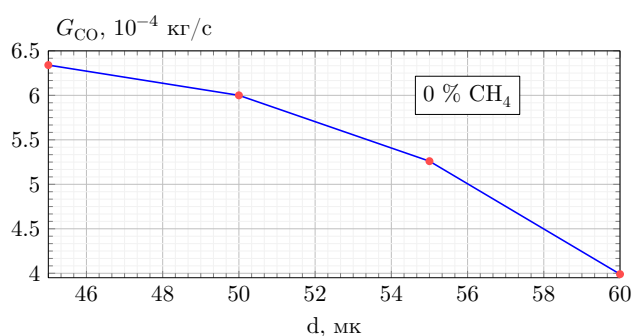


Рис. 3.16. Графік залежності емісії CO на виході від діаметру частинок

3.4. Висновки до розділу 3

Було досліджено процес горіння вугільного пилу в повітрі, метаноповітряній суміші та в реакторі більшої висоти.

Для випадку повітряної суміші було виявлено, що збільшення діаметру вугільних частинок впливає на емісію СО, максимальну температуру та хімічний недопал.

Хімічний недопал збільшується при зростанні діаметру частинок. Максимальна температура навпаки зменшується разом з СО. Також, діаметр частинок впливає на розподіл температур вздовж осі реактора.

Збільшення висоти реактора на 50 см призвело до зменшення хімічного недопалу до нуля для частинок 35 — 60 мк. Даний реактор збільшує діапазон діаметру у межах 60 — 75 мк і більше. Також, температура та емісія при зростанні хімічного недопалу падає.

Для випадку метаноповітряної суміші було побудовано кілька моделей з концентрацією метану, яка міняється у межах 0 — 6 % з кроком 0,25 %. Використання CH_4 зменшує хімічний недопал у порівнянні повітряною сумішшю. Концентрація СО зменшується в порівнянні з ректорами більшої висоти. Також, паливо повністю згорає при діаметрі частинок 35 мк.

Під час використання повітря хімічний недопал складає 0,33 — 20 %. Для реактора з більшою висотою 3,56 — 8 %. Для метаноповітряної суміші, коли CH_4 0.25, 1.5, 4.75 % хімічний недопал становить 0.1 — 11,1 %.

Під час використання повітря емісія СО складає $4 — 6,3 \cdot 10^{-4}$ кг/с. Для реактора з більшою висотою $1 — 1,6 \cdot 10^{-4}$ кг/с. Для метаноповітряної суміші, коли CH_4 0.25, 1.5, 4.75 % емісія монооксиду становить $1.4 — 7,85 \cdot 10^{-5}$.

Метою роботи було дослідити вплив діаметру вугільних частинок на концентрацію хімічного недопалу та емісію оксиду вуглецю. За допомогою ANSYS Fluent було проведено чисельне моделювання горіння вугільних частинок, знайдено концентрацію метану за якої утворюється мінімальна кількість не згорілого карбону та оксиду вуглецю, показано, що геометрія реактору впливає на хімічний недопал та оксид вуглецю.

Аналіз літературного огляду показав, що реакція горіння вугільної частинки являється не простим процесом та потребує складним математичних моделей. Процес горіння твердого пилоподібного палива вимагає ретельного вибору параметрів системи та середовища.

Дослідження за допомогою ANSYS Fluent показало, що початкові граничні умови суттєво впливають на поведінку моделі. Також, велику роль відіграють фізичні методи, які були застосовані в моделюванні.

Аналіз моделі показав, що зростання діаметру вугільних частинок на 25 мк у повітряній суміші збільшує хімічний недопал на 20 %, а емісія CO зменшується на 40 %.

Для реактора з більшою висотою показано, що зростання діаметру вугільних частинок на 15 мк збільшує хімічний недопал на 8 %, а емісія CO зменшується на 37 %.

Для моделі, яка використовує метаноповітряну суміш з концентрацій CH_4 0 — 6 % показано, що хімічний недопал зменшується на 55 — 98 %, а емісія CO в 10 — 30 раз, якщо порівнювати з результати повітряною сумішшю та з даними реактора більшої висоти.

Для збільшення екологічності краще використовувати метаноповітряну суміш. Для зменшення хімічного недопалу, краще використовувати реактор з більшою висотою.

1. 15.1.4 Setting up Coal Simulations with the Coal Calculator Dialog Box. — 2009. — URL: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node517.htm#coal-reaction1> (дата зверн. 15.04.2019).
2. 4.5.3 Wall Boundary Conditions. — 2009. — URL: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node68.htm> (дата зверн. 21.04.2019).
3. Amy L., Ahmadi G. Dispersion and Deposition of Spherical Particles from Point Sources in a Turbulent Channel Flow // Aerosol Science and Technology. — 1992. — Vol. 16. — P. 209–226.
4. Baum M. M., Street P. J. Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles. — 1971. — P. 231–243.
5. Cheng P. Two-dimensional radiating gas flow by a moment method // AIAA Journal. — 1964. — Vol. 2, no. 9. — P. 1662–1664.
6. Comparison of Measurements and Predictions of Flame Structure and Thermal NO_x, in a Swirling, Natural Gas Diffusion Flame / R. D. Boardman [et al.] // Combustion Science and Technology. — 1993. — Vol. 93, no. 9. — P. 193–210. — DOI: 10.1080/00102209308935289.
7. Components, formulations, solutions, evaluation, and application of comprehensive combustion models / A. M. Eaton [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. — 1999. — Vol. 25, no. 4. — P. 387–436. — DOI: 10.1016/s0360-1285(99)00008-8.
8. Launder B. E., Spalding D. B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. — London : Academic Press, 1972. — P. 851.
9. Ranforcing J. M., Jason E. F. Enforcing realizability in explicit multi-component species trasport // Fire Safety Journal. — 2015. — Vol. 78. — P. 180–187.
10. Siegel P., Howell J. R. Thermal Radiation Heat Transfer. — Washington : Hemisphere Publishing Corporation, 1992. — P. 951.

11. Smith I. W. Combustion and Flame. — 1971.
12. Species Transport Equations. — 2009. — URL: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node128.htm> (дата зверн. 08.04.2019).
13. Stephen R. T. An Introduction to Combustion. Concepts and application. — New York : McGraw-Hill, 2012. — ISBN 978-0-07-338019-3.
14. Wilcox D. C. Formulation of the k - ω Turbulence Model Revisited // AIAA Journal. — 2008. — Vol. 46, no. 11. — P. 2823–2838.
15. Агроксин А. А. Химия и технология угля. — «Недра», 1969. — С. 240.
16. Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. — Москва : Энергоатомиздат, 1986. — С. 208.
17. Белосельский Б. С. Технология топлива и энергетических масел. — 2-е издание. — Издательство МЭИ, 2005. — С. 348. — ISBN 978-5-91444-001-2.
18. Білим П. А., Фесенко Г. В. Теорія горіння та вибуху. — Харків : Курс лекцій, 2012.
19. Гудков С. В. Введение в теорию горения и газификации топлива. — Москва : Государственное наачноо-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1960. — С. 167.
20. Капуцкий Ф. Н., Тикавый В. Ф. Пособие по химии для поступающих в вузы. — Минск: Вышэйш. школа, 1979. — С. 384.
21. Лавров Н. В., Шурыгин А. П. Введение в теорию горения и газификации топлива / под ред. В. М. Попов. — Москва : Издательство академии наук СССР, 1962. — С. 212.
22. Лавров Н. В., Шурыгин П. А. введения в теорию горения и газификации топлива. — Москва : Издательство Академии наук СССР, 1962. — С. 343.
23. Левич В. А., Туник Ю. В. Инициирование детанационного горения угольной пыли в метановоздушной смеси // Физика горения и взрыва. — 1987. — № 4.

24. Лешевич В. В., Пенязьков О. Г., Шимченков С. Ю. Воспламенение метановоздушной смеси в присутствии угольной пыли при температурах 800 - 1200 К // Горение и взрыв. — Москва, 2016. — Т. 9, № 3.
25. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Моисеева Д. М. Устойчивость горения полидисперсной угле-метано-воздушной смеси горелке с рекуперацией тепла // Вестник Томского государственного университета. — 2017. — № 48.
26. Однолько А. А., Колодяжный С. А., Старцева Н. А. Теория горение и взрыва. Возникновение и распространение горения. Оценка пожаровзрывоопасности веществ и материалов. — Воронеж : Курс лекций, 2011. — С. 266.
27. Померанцева В. В. Основы практической теории горения. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. — С. 309.
28. Русчев Д. Д. Хімія твердого топлива / под ред. Д. А. Розенталя. — Издательство "Химия", 1976. — С. 256.
29. Сидельковский Л. Н., Юренев В. Н. Котельные установки промышленных предприятий. — 3-е издание. — Издательство «Энергия», 1988. — С. 528.
30. Сполдинг Д. Б. Горение и массообмен. — Москва : Перевод на русский язык «Машиностроение», 1985. — С. 240.
31. Станислав К. М., Костенко В. Ю., Завиялова З. М. Влияние примесей шахтных горючих газов на взрывоопасность угольных аэрозолей. — Brenna, 2012. — С. 176—184.
32. Федоров А. В., Тропин Д. А., Пенязьков О. Г. Влияние угольных частиц на времена задержки воспламенения метано-воздушной смеси // Горение и взрыв. — Москва, 2016. — Т. 9, № 6. — С. 3—16.
33. Физика горения и взрыва метановоздушной смеси и угольной пыли / Л. И. Гречихин [и др.]. — 2014. — С. 104—112.
34. Хзмалян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства. — Москва : Издательство «Энергия», 1976. — С. 488.

35. Энергохимическое обоснование концентрационного предела воспламенения и взрыва угольной пыли и метана / И. Е. Колесниченко [и др.] // Горная Промышленность. — 2016. — № 4. — С. 61—64.