

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій
Управління енергетичними та економічними процесами

Інтелектуальні системи енергопостачання




Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: Дослідження процесу енергоперетворення твердих побутових відходів в паливо

за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті


зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав: студент групи ЕЕ2421:

		/ Геннадій ЦУКЛОВ /
Керівник:		/доцент Олександр ЖЕВЖИК/
Нормоконтролер:		/доцент Ірина ПОТАПЧУК /

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

Студент


_____ (підпис)

Дніпро – 2026 рік

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

Energy and economic processes management

Intellectual power supply systems

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: Research into the process of energy conversion of solid household waste into fuel.

according to educational curriculum Energy and electromechanical systems in transport
in the Speciality: 141 Power engineering, electrical engineering and
electromechanics

Done by the student of the group EE2421: / Hennadii Shchuklov /

Scientific Supervisor: /Ass. Prof. Oleksandr Zhevzhyk /

Normative controller : / Ass. Prof. Iryna Potapchuk /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІСЕ
Дмитро БОСИЙ
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
Дата _____

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

магістр з електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки
(ступінь вищої освіти)

студенту Щуклову Геннадію Миколайовичу
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: “ Дослідження процесу енергоперетворення твердих побутових відходів в паливо”.

Керівник роботи: Жевжик Олександр Владиславович, к.т.н, доцент
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "02" 10 2025 р. № 1401ст

2. Строк подання студентом роботи: 15.01.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: _____

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

Вступ

Огляд літератури за темою і вибір напрямку досліджень

Розробка методики розрахунку газодинамічних характеристик реактора та хімічного складу отриманого палива з ТПВ

Результати розрахунків

Висновки

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

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 та вибір напрямку досліджень	15.11.2025	
3	Методика розрахунку газодинамічних характеристик реактора та хімічного складу отриманого палива з ТПВ	01.12.2025	
4	Результати розрахунків	29.12.2025	
4	Висновки	01.01.2026	
5	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2026	
6	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	20.01.2026	

Студент

_____ (підпис)

Геннадій
ЩУКЛОВ

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Олександр ЖЕВЖИК
_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

другого (магістерського) рівня вищої освіти Щуклова Г. М. на тему:
«Дослідження процесу енергоперетворення твердих побутових відходів в паливо»

Складова кваліфікаційної роботи	Кількість	Обсяг
Пояснювальна записка	1	56 стор.
Графічна частина (за наявності)	-	-.
Демонстраційний матеріал	1	12 слайдів
Електронна частина (за наявності): назва файлу з розширенням	-	-

Керівник: _____ /Олександр ЖЕВЖИК /

Нормоконтролер: _____ / Ірина ПОТАПЧУК /

Завідувач кафедри ІСЕ: _____ / Дмитро БОСИЙ /

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 56 сторінок, 3 частини, 10 рисунків, 1 таблиця, 29 використаних джерел.

Об'єкт дослідження. Реактор для термоперетворення біогазу з ТПВ на паливо.

Мета роботи. Побудова математичної моделі руху газу в реакторі енергоперетворення ТПВ на паливо та методу розрахунку хімічного складу отриманого палива, яке збагачене воднем та розрахунок поля швидкостей закрученого газу в камері реактора за допомогою чисельного методу. Визначення параметрів термодинамічної системи, яка визначально складалась з біогазу, при температурах $873,2...2273,2$ К і тиску 0,1 МПа, для визначення хімічного складу і температур, коли досягається максимальна кількість водню. та розрахунок газодинамічних параметрів термохімічного реактора.

Методи дослідження. В роботі використовувалися чисельні методи дослідження та розв'язку диференціальних рівнянь.

На основі законів збереження маси, кількості руху та енергії побудована математична модель руху газу в термохімічному реакторі та методика розрахунку хімічного складу газу. Отримано поле швидкості та температури в реакторі, розраховано хімічний склад газу на виході з реактору.

Ключові слова: РЕАКТОР, ТВЕРДІ ПОБУТОВІ ВІДХОДИ, БІОГАЗ, РОЗПОДІЛ ШВИДКОСТЕЙ, ХІМІЧНИЙ СКЛАД ГАЗУ

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ І ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ	14
2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ РІВНОВАЖНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ОТРИМАНОГО ПАЛИВА В ПРОЦЕСАХ ЙОГО ВИРОБНИЦТВА З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ	17
2.1 Методика розрахунку газодинамічних характеристик реактора	17
2.2 Методика розрахунку рівноважного хімічного складу палива	27
2.3 Методика теплового розрахунку печі для спалювання ТПВ	32
2.3.1 Розрахунок горіння паливної маси печі	32
2.3.2 Розрахунок основних параметрів печі	34
2.3.3 Розрахунок зовнішнього теплообміну	35
2.3.4 Розрахунок теплового балансу печі	39
3 ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ПАЛИВ І УМОВ ЙОГО ОТРИМАННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ	45
3.1 Результати розрахунку рівноважного хімічного складу палива, яке збагачене воднем	45
3.2 Результати розрахунку газодинамічних характеристик реактора	50
ВИСНОВКИ	52
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	53

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ				
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата					
Розробив		Щуклов			Дослідження процесу енергоперетворення твердих побутових відходів в паливо	Літера	Аркуш	Аркушів	
Консульт.						М	Д	7	56
Керівник		Жевжик				МОНУ, УДУНТ, ІСЕ EE2421			
Н. контр.		Потапчук							
Зав. каф.		Босий							

ВСТУП

Важливість перероблення твердих побутових відходів (ТПВ) у сучасній світовій практиці зумовлена не лише екологічними, а й соціально-економічними факторами. За даними Global Waste Management Outlook 2024 [1], ефективне управління відходами та розширення перероблення здатні скоротити обсяги викидів метану з полігонів до 50 %, зменшити негативний вплив на клімат і створити мільйони робочих місць.

У світовій практиці промислової переробки твердих побутових відходів застосовується низка методів, частка яких суттєво відрізняється залежно від рівня розвитку країни та наявної інфраструктури. Найбільшу питому вагу й досі займає захоронення на полігонах – близько 40 % (рис. 1), що характерно передусім для держав із недостатньо розвинутою системою управління відходами [1]. Водночас останніми роками спостерігається чітка тенденція до зростання частки спалювання з отриманням енергії (WtE), яка зараз становить близько 23 % у глобальному масштабі, а в таких країнах, як Китай, Японія та окремі держави ЄС, перевищує 30–50 % [2,3]. Механізоване сортування та вилучення вторинної сировини забезпечує приблизно 20 % обсягів перероблення, тоді як компостування органічної частини відходів охоплює близько 11 % і поширене передусім у Європі та Північній Америці [4]. Інноваційні методи – піроліз, бітумізація, пресування з подальшим використанням у будівництві – наразі мають експериментальний характер і становлять менше 2 % [5,6]. Така структура свідчить про поступовий перехід від полігонного захоронення до термічної та матеріальної утилізації, що відповідає концепції циркулярної економіки та сучасним екологічним викликам.

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

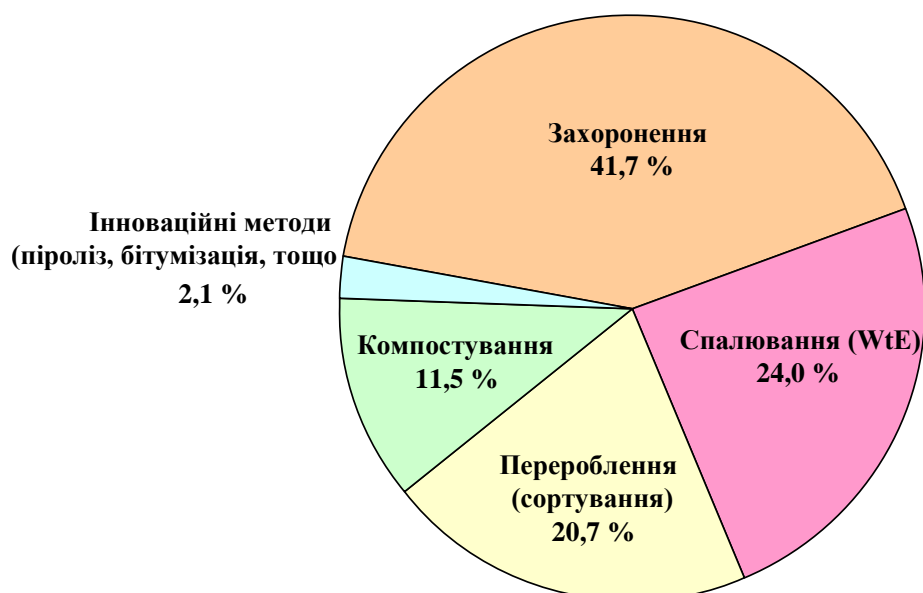


Рисунок 1 – Глобальна структура методів переробки ТПВ

В останні роки у світовій практиці частіше переробляють ТПВ методом спалювання [2,3,5,7,8]. Цей метод є переробкою побутових відходів шляхом спалювання їх у топках спеціальних печей, котлів або реакторів. Існує багато причин вибору цього. Основна з них – відповідність санітарно-гігієнічним вимогам, тому сміттєспалювальні заводи можуть розташовуватися поблизу житлової забудови, що значно скорочує витрати на вивіз сміття із житлових зон. Заводи високоомеханізовані та автоматизовані, обслуговуючий персонал не має контакту з відходами.

У котлах для ТПВ горіння протікає в твердому шарі (на колосникових решітках) і в об'ємі топкового простору. Колосникові решітки є одним з найважливіших елементів сміттєспалювальної установки. Конструкції колосникових решіток дуже різноманітні. Сучасними безколосниковими системами є барабанні печі та реактори. Барабанні печі бувають з прямоточним рухом димових газів та палива, протитечійним та комбінованим.

Обертові барабанні печі з протитечією димових газів і палива застосовують для спалювання деяких промислових відходів, переважно осаду стічних вод. Для побутових відходів вони мало розповсюджені, хоч у майбутньому можуть стати перспективними.

Країни ЄС у 2019 році взяли добровільне зобов'язання зробити Європу першим кліматично нейтральним континентом до 2050 року. У 2020 році проведена додаткова комплексна оцінка, яка дозволила збільшити мету ЄС щодо скорочення викидів, а саме вже до 2030 року скоротити викиди парникових газів на 55 % в порівнянні з 1990 роком. Передбачається, що така мета може бути досягнута масштабним використанням водневих технологій.

На теперішній час основним, найбільш дешевим методом отримання водню є парова конверсія викопного палива (метану, вугілля, нафти), але він призводить до викидів від 70 до 100 мільйонів тонн діоксиду вуглецю на рік в ЄС [9].

Незважаючи на те, що реалізація програми декарбонізації Європи потребує безпрецедентних фінансових витрат, головні наслідки будуть отримані за рахунок чистого повітря, прохолодніших та зеленіших міст, більш здорових громадян, меншого споживання енергії, створення нових робочих місць, технологій та промислових можливостей, здоровішої планета для майбутніх поколінь [10]. При цьому в досягненні цієї мети велика надія покладається на виробництво саме "чистого" ("зеленого") водню, який відноситься до "відновлюваного" [10]. Отримання "відновлюваного" водню передбачається в першу чергу шляхом електролізу, але можливо і з біогазу [9].

Біогаз в промислових масштабах отримують шляхом анаеробної переробки відходів і залишків агропромислового комплексу (тваринництва, птахівництва і інш), харчова, переробної промисловості, він є відновлювальною сировиною, яка може бути використана і як палива для отримання теплоти та електроенергії, наприклад в когенераційних установках, так і для подальшого перетворення з виділенням водню.

Великий вміст баласту в первинному біогазі суттєво зменшує теплоту згоряння, що значно знижує енергоефективність прямого використання біогазу як палива та потребує використання спеціальних пальникових пристроїв. З біогазу можна отримати біометан, який після відповідного очищення і збачення відповідає природному газу, що надає можливість розподіляти його

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

через існуючу газорозподільну мережу і тільки потім використовувати існуючі технології виробництва водню, але відповідно [11] такий метод менш енергоефективен.

У світі досить давно вже розроблені і впроваджені технології та обладнання для видобутку біогазу з полігонів та звалищ. Наприклад компанія «Зорг Біогаз» (Zorg Biogas GmbH) пропонує послуги для видобутку біогазу як зі звалищ так і з полігонів, при цьому відзначається, що на полігонах ТПВ утворюється такий же біогаз і відбуваються такі ж процеси анаеробного бродіння, як і в біогазових станціях. Різниця у тому, що у біогазових реакторах ці процеси відбуваються прискорено, а у полігонах уповільнено. В організованому полігоні, у момент укладання, в тіло полігону укладаються перфоровані труби для збирання біогазу. Сам полігон гідроізолюється з усіх боків, у тому числі зверху. У такому разі немає витоку біогазу з полігону та вихід газу максимальний. Полігони виконуються досить глибокими 80-100 м. Сміття звозиться і в журналі вказується які відходи в який час і в яку частину полігону потрапили. Біогаз із такого полігону може видобуватись 8-12 років.

В організованому полігоні для ТПВ вертикальні труби для видобутку біогазу закладаються в момент закладки полігону або після його заповнення буряться свердловини.

У неорганізованому полігоні відходи звалюються без закладки горизонтальних труб і навіть без гідроізоляції. Глибина полігонів від 20 до 40 м. Біогаз видобувається 3-5 років.

У неорганізованому полігоні буряться свердловини та закладаються вертикальні труби. Верхня частина свердловини бетонується. Свердловини буряться на відстані 15-25 м одна від одної. Поле дії свердловини має перекривати зони між свердловинами.

Біогаз відкачується з вертикальних труб і збирається у газові колектори. Потім проходить осушення, очищення від домішок, компримується і подається на подальший цикл використання.

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Біогаз у полігонах ТПВ відрізняється низьким вмістом метану (30-45 %) та високим вмістом домішок. Сірководень – до 3000-5000 ppm, тому потрібне встановлення фільтрів.

В Україні діють норми на створення полігонів для ТПВ і видобутку біогазу з них [12].

Актуальність роботи.

Зважаючи на вже сформовану у світі структуру використання ТПВ (див. рис. 1) ("захоронення" та "спалювання" дають в сумі 65,7 %, "сортування" 20,7 % можна розглядати як попередній етап) і намагання країн ЄС перейти на використання водню замість природного газу, то видобуток біогазу на полігонах ТПВ з подальшим його енергоперетворенням на синтез-газ збагачений воднем, який можна використовувати як паливо, є перспективним, а робота з дослідження процесів, що відбуваються в реакторі є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими напрямками діяльності кафедри.

Робота пов'язана з пріоритетними тематичними напрямками, зазначених на 2025 рік у розділі 2 Перспективного плану розвитку Українського державного університету науки і технологій за науковим напрямом «Технічні науки» на період з 2021 по 2025 роки зі змінами, внесеними Додатковою угодою № БФ/4-2024 до Договору № БФ/22-2021 від 04 серпня 2021 р., (Додаток А до Додаткової угоди), а саме у 2025 році на кафедрі було реалізовано пріоритетний тематичний напрям «Дослідження процесів виробництва і використання палив з твердих побутових відходів» як прикладне дослідження.

Мета роботи.

1. Побудова математичної моделі руху газу в реакторі енергоперетворення ТПВ на паливо та методу розрахунку хімічного складу отриманого палива, яке збагачене воднем та розрахунок поля швидкостей закрученого газу в камері реактора за допомогою чисельного методу.

2. Визначення параметрів термодинамічної системи, яка визначально складалась з біогазу, при температурах 873,2...2273,2 К і тиску 0,1 МПа, для визначення хімічного складу і температур, коли досягається максимальна

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

кількість водню. та розрахунок газодинамічних параметрів термохімічного реактора.

Методи дослідження. В роботі використовувалися чисельні методи дослідження.

Об'єкт дослідження. Реактор для термоперетворення біогазу з ТПВ на паливо.

Предмет дослідження. Термохімічні процеси що відбуваються в реакторі.

Наукова новизна.

Розроблено математичну модель руху газів та хімічного складу у реакторі. Розв'язок рівнянь математичної моделі отримано чисельним методом. В результаті отримано профілі осьової, радіальної та обертальної швидкості газу в реакторі при наявності початкової закрутки потоку.

В результаті розрахунків в залежності від температури визначено рівноважні концентрації термодинамічної системи, яка складається з біогазу ТПВ середнього состава. Визначено, що слабовиразний максимум об'ємного вмісту водню знаходиться в інтервалі температур 1300...2000 К, а раціональна температура нагріву складає ≈ 1100 К при тиску 0,1 МПа, підвищення якої майже не призводить до суттєвої зміни складу газу.

Апробація результатів магістерської роботи.

Результати роботи доповідались на XIV-а Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств».

Публікації.

Жевжик О. В., Потапчук І. Ю., Ємченко Д.С., Щуклов Г.М. Використання високотемпературних технологій для переробки твердих побутових відходів у контексті взаємодії залізниць та промислових підприємств. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств*. Дніпро. 2025. с.38-39. URL:

<https://diit.ust.edu.ua/diit/documentation/news/30-05-2025-5KTV-promtrans-2025.pdf>

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРОЦЕСІВ І ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ВИРОБНИЦТВА І ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВ З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

В [13] проведено техніко-економічний аналіз всього циклу виробництва водню з біогазу, з використанням програмного забезпечення для моделювання процесів у хімічній промисловості Aspen Plus VII та кінетичних моделей реакцій. Авторами робиться висновок, що кінцева вартість виробництва залежить від швидкості реакцій і чим більша швидкість, тим витрати на виробництво водню менше.

Опубліковано огляди біологічних методів виробництва відновлюваного водню [14]–[16].

Також для виробництва відновлюваного водню існують технології термохімічної конверсії біомаси (паровий риформінг, піроліз, газифікація та надкритична газифікація води) [17].

Мембранному способу поділу середовищ з метою отримання водню приділено увагу [18].

Джерелом енергії для отримання водню в першу чергу повинна стати "зелена" енергетика.

В сонячних концентраторах досягається температура 2000 К і більше, яка може бути використувуватись для хімічних технологій одержання водню, що потребують високих температур.

Зважаючи на те, що вже зафіксовано доволі багато випадків, коли існує локальне надлишкове вироблення відновлюваної електроенергії, що провокує її від'ємну ціну. Таким чином, існує актуальна проблема акумулювання та використання надлишків зеленої генерації, які можна використати для виробництва синтез-газу з максимальним вмістом водню у плазмових [19] або електродугових реакторах [20].

У статті [21] з використанням програмного забезпечення Fluent була розроблена CFD-модель системи спалювання небезпечних відходів у обертовій

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

печі з протитечією без закрутки потоку повітря на вході. Хімічні реакції розраховувалися з допомогою моделі швидкості Арреніуса. В результаті розрахунків авторами отримані для конкретної печі розподіл температур та хімічного складу газів у печі. Моделювання показало, що система спалювання працювала якнайкраще при швидкості подачі 1,5 м/с.

В [22] шляхом чисельного моделювання визначено вплив часу перебування частинок в обертових печах на конверсію біомаси. Розраховано піроліз в обертових печах за різних робочих умов та геометричних параметрів (діаметр печі 0,1...1 м, відношення діаметра частинок до діаметра печі $5 \cdot 10^{-3} \dots 40 \cdot 10^{-3}$, відношення довжини печі до її діаметра 1...10, кут нахилу печі $0.1 \dots 8^\circ$, число Фруда $10^{-3} \dots 10^{-2}$, обертальне число Рейнольдса $10^2 \dots 16 \cdot 10^3$, та число Пекле 5...100. У цій статті наведено дані по 13851 моделювання окремих випадків, які включають середній час перебування частинок, температури газу, шару та стінок печі, масові потоки твердих та газоподібних речовин, теплові потоки та висоту твердого шару по всій довжині печі.

В [23] проведено математичне моделювання горіння в промисловій обертовій печі цементного заводу та вивчення сценаріїв та оцінки потенціалу заміни викопного палива альтернативними видами палива для зменшення викидів CO₂. 3D CFD модель турбулентного горіння була сформульована в Ansys® для пальника Pillard NOVAFLAM®, де використовувалися паливо, отримане з відходів та нафтового коксу, а також враховувалися різні масові потоки вторинного повітря. З отриманих результатів зроблено висновок, що на результат процесу горіння значно впливає коефіцієнт надлишку повітря. Очікувано отримано, що збільшення масової витрати вторинного повітря сприяє повному та ефективному процесу горіння, та призводить до покращеного перетворення палива та зменшення утворення забруднюючих речовин, таких як CO, сажа та незгорілі вуглеводні. Спостерігалось збільшення ефективності горіння з 93 % до 96 % у поєднанні з незначним зменшенням масової частки забруднюючих речовин у димових газах. Отримані розрахунком

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

профілі температури та швидкості відповідали інформації, наданій операторами заводу. Результати цього дослідження надали інформацію для оптимізації ефективності згоряння та зменшення викидів забруднюючих речовин під час виробництва цементу реальної обертової печі цементного заводу.

Дослідження [24] представляє 3D-чисельне моделювання для вивчення термічного перетворення деревини. Досліджено багатозонний розподіл теплоти в обертовій печі за допомогою CFD, аналітичного алгоритму та інструментів вимірювання в різних зонах обладнання. Результати CFD та експериментальні дані показали, що за рахунок раціоналізації можна досягти щонайменше 31 % економії енергії та на 21 % підвищити якість біовугілля.

В [25] розроблено модель обертової печі для обробки твердих відходів. Характеристики потоку газу без закрутки на вході та викидів під час згоряння в обертовій печі аналізуються за допомогою методу скінченних елементів. Модель цифрового двійника для обробки твердих відходів у обертовій печі розроблена за допомогою числового моделювання та машинного навчання. Отримано поля концентрації компонентів димових газів (CO , CO_2 , H_2O).

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ РІВНОВАЖНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ОТРИМАНОГО ПАЛИВА В ПРОЦЕСАХ ЙОГО ВИРОБНИЦТВА З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

2.1 Методика розрахунку газодинамічних характеристик реактора

Реактор для енергоперетворення має циліндричну форму (рисунок 2.1). Через завихрювач у реактор тангенціально подається попередньо нагрітий газ в трубчастому рекуператорі до 350 °С. На виході з реактора температура газів >500 °С і може змінюватись за рахунок, наприклад, електричного нагрівання (наприклад плазмотронами) або за рахунок часткового спалювання отриманого палива.

Оскільки рух середовища відбувається в циліндричному каналі, рішення задачі про розподіл швидкостей доцільно шукати в циліндричній системі координат (r, φ, z) ; де r – поточний радіус, φ – кут, що відраховується від проекції радіуса вектора на площину (r, z) , z – довжина реактора по осі симетрії (див. рис. 2.1).

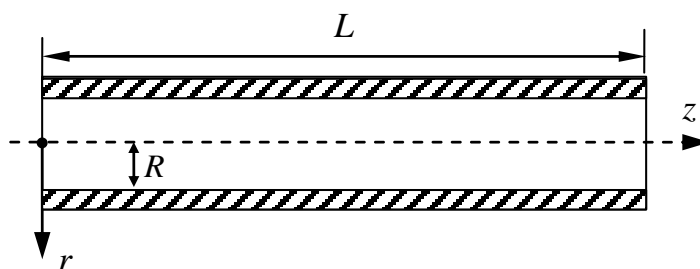


Рисунок 2.1 – Схема до розрахунку

При безперервній роботі реактора рух середовища не залежить від часу t і розподіл швидкостей не залежить від кута φ , то б то похідні:

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial \varphi} = 0. \quad (2.1)$$

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Рівняння збереження кількості руху в проекціях на осі циліндричної системи координат [26] з урахуванням (2.1):

$$V \frac{\partial U}{\partial r} + U \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \quad (2.2)$$

$$V \frac{\partial V}{\partial r} + U \frac{\partial V}{\partial z} - \frac{W^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right), \quad (2.3)$$

$$V \frac{\partial W}{\partial r} + U \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{V \cdot W}{r} = \nu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} - \frac{W}{r^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right), \quad (2.4)$$

де V, W, U – проекції вектора швидкості осі координат (r, φ, z) відповідно; P – тиск; ν – ефективна в'язкість потоку газу.

Рівняння нерозривності

$$\frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} + \frac{\partial U}{\partial z} = 0. \quad (2.5)$$

Перетворимо рівняння до безрозмірного вигляду, при цьому як масштаби виберемо радіальну швидкість у реакторі V_{in} і радіус реактору R , тоді безрозмірні величини матимуть вигляд:

$$\bar{V} = \frac{V}{V_{in}}; \quad \bar{U} = \frac{U}{V_{in}}; \quad \bar{W} = \frac{W}{V_{in}}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R}; \quad \bar{z} = \frac{z}{R}. \quad (2.6)$$

Рівняння (2.2–2.5) у безрозмірному вигляді з урахуванням (2.6) мають вигляд (риски над безрозмірними величинами опущені):

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(V \cdot U + \frac{1}{Re} \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(U \cdot U + \frac{1}{Re} \frac{\partial U}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{V \cdot U}{r} + \frac{1}{r Re} \frac{\partial U}{\partial r} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(V \cdot V + \frac{1}{Re} \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(U \cdot V + \frac{1}{Re} \frac{\partial V}{\partial z} \right) &= \\ &= -\frac{\partial P}{\partial r} - \frac{V \cdot V}{r} + \frac{W^2}{r} + \frac{1}{r Re} \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r^2 Re} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(V \cdot W + \frac{1}{Re} \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(U \cdot W + \frac{1}{Re} \frac{\partial W}{\partial z} \right) &= \\ &= -2 \frac{V \cdot W}{r} + \frac{1}{r Re} \frac{\partial W}{\partial r} - \frac{W}{r^2 Re} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} + \frac{\partial U}{\partial z} = 0, \quad (2.10)$$

де $Re = \frac{V_{in} \cdot R}{\nu}$ число Рейнольдса;

Граничні умови до (2.7–2.10):

- на осі симетрії (при $r=0$; $0 < z \leq L$)

$$V=0, \quad \frac{\partial U}{\partial r} = 0, \quad W=0;$$

- на стінці реактору виконується умова прилипання (при: $r=R$; $0 < z \leq L$)

$$V=0, \quad U=0, \quad W=0,$$

- на вході в реактор (при $z=0$, $0 < r \leq R$)

$$U=U_{in}, \quad V=V_{in}, \quad W=W_{in},$$

де U_{in}, V_{in}, W_{in} – швидкості на вході в реактор;

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

- на виході з реактору (при $z=L$, $0 < r \leq R$)

$$\frac{\partial U}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial z} = 0.$$

Для розв'язку системи рівнянь (7-10) використовували чисельний метод з дискретизацією диференціальних рівнянь на шаховій сітці (рисунок 2.2) і використанням відомого алгоритму SIMPLE [27]. Така сітка дає змогу під час дискретизації використовувати різницю тисків у сусідніх вузлових точках та підвищити точність розв'язання.

Для визначення ефективної в'язкості потоку використовували методику [28].

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

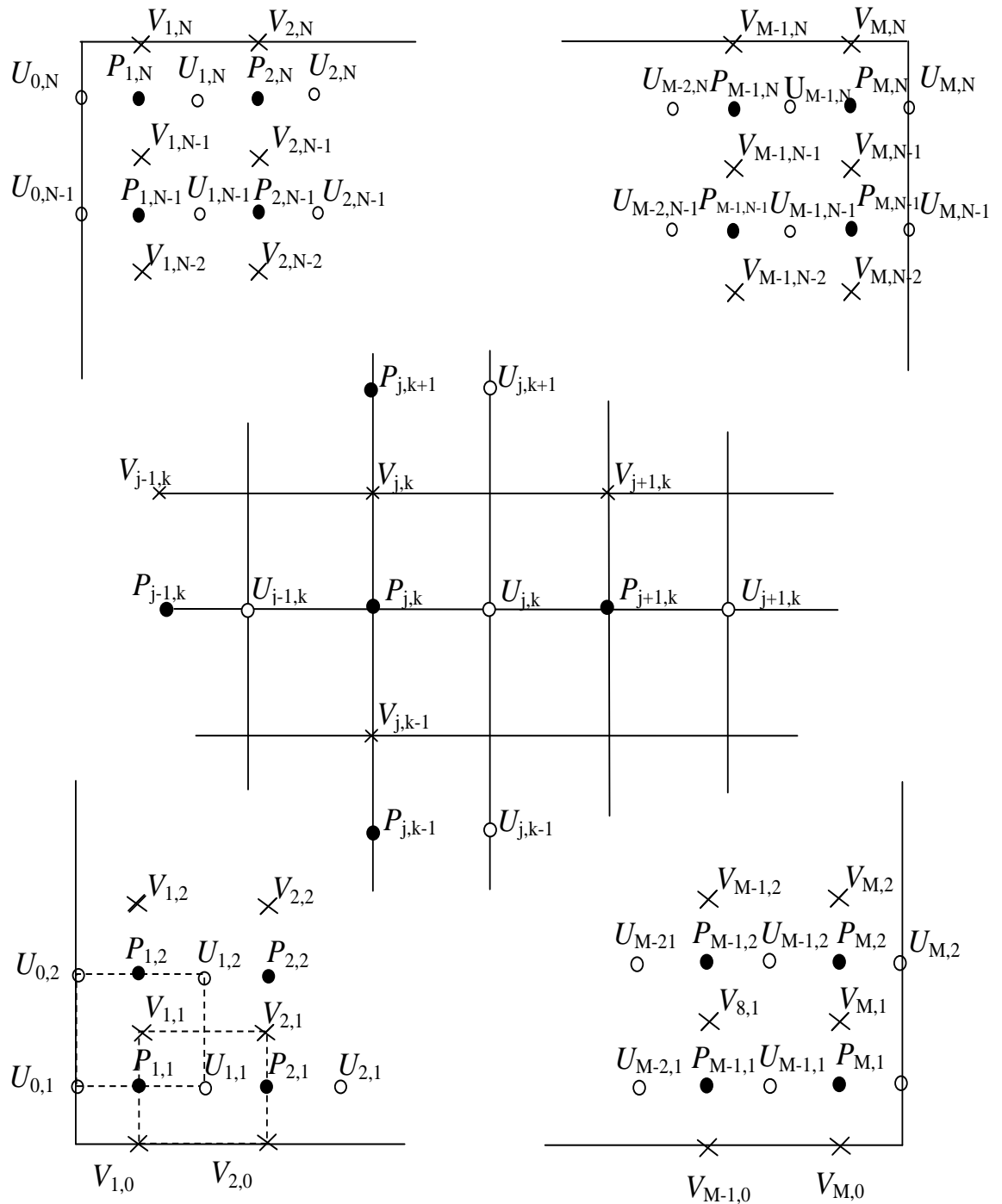


Рисунок 2.2 – Розрахункова сітка

Для отримання дискретного аналога диференціальних рівнянь проінтегруємо їх по відповідним контрольним об'ємам.

Для радіальної швидкості:

$$\int_{r_{k-1/2}}^{r_{k+1/2}} \int_{z_{j-1/2}}^{z_{j+1/2}} \frac{\partial}{\partial r} \left(V \cdot V + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial V}{\partial r} \right) dr dz + \int_{r_{k-1/2}}^{r_{k+1/2}} \int_{z_{j-1/2}}^{z_{j+1/2}} \frac{\partial}{\partial r} \left(U \cdot V + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial V}{\partial z} \right) dr dz =$$

$$= \int_{r_{k-1/2}}^{r_{k+1/2}} \int_{z_{j-1/2}}^{z_{j+1/2}} \left(-\frac{\partial P}{\partial r} - \frac{V \cdot V}{r} + \frac{W^2}{r} + \frac{1}{r \text{Re}} \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r^2 \text{Re}} \right) dr dz$$

Для рівняння неперервності:

$$\int_{r_{k-1/2}}^{r_{k+1/2}} \int_{z_{j-1/2}}^{z_{j+1/2}} \left(\frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} + \frac{\partial U}{\partial z} \right) dr dz = 0.$$

Використовуючи аналогічні перетворення, наведені в [27] можна отримати дискретний аналог для радіальної швидкості:

$$a_{j,k}^v \cdot V_{j,k} = a_{j+1,k}^v \cdot V_{j+1,k} + a_{j-1,k}^v \cdot V_{j-1,k} + a_{j,k+1}^v \cdot V_{j,k+1} + a_{j,k-1}^v \cdot V_{j,k-1} + b + \left(P_{j,k+1/2} - P_{j,k-1/2} \right) \cdot \Delta z_j; \quad (2.11)$$

де :

$$a_{j+1,k}^v = \left(\left[-U_{j+1/2,k}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta z_{j+1/2}} \right) \cdot \Delta r_k; \quad (2.12)$$

$$a_{j-1,k}^v = \left(\left[U_{j-1/2,k}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta z_{j-1/2}} \right) \cdot \Delta r_k; \quad (2.13)$$

$$a_{j,k+1}^v = \left(\left[-V_{j,k+1/2}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta r_{k+1/2}} \right) \cdot \Delta z_j; \quad (2.14)$$

$$a_{j,k-1}^v = \left(\left[V_{j,k-1/2}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta r_{k-1/2}} \right) \cdot \Delta z_j; \quad (2.15)$$

$$Sc_{j,k} = \left(\frac{W_{j,k+1/2}^2}{r_{j,k}} \right) \cdot \Delta r_k \Delta z_j + (V_{j,k+1/2} - V_{j,k-1/2}) \frac{\Delta z_{j,k}}{r_{j,k} \cdot \text{Re}} = b; \quad (2.16)$$

					02.15.EE2421.KPM.2026-ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

$$S_{j,k} = \frac{\Delta r_{j,k} \cdot \Delta z_{j,k}}{r_{j,k}^2 \cdot \text{Re}}; \quad (2.17)$$

$$a_{j,k}^v = a_{j+1,k}^v + a_{j-1,k}^v + a_{j,k+1}^v + a_{j,k-1}^v - S_{j,k}; \quad (2.18)$$

Аналогічно після відповідного інтегрування по контрольних об'ємах та перетворень отримаємо дискретний аналог для обертальної W та осьової швидкостей U :

$$a_{j,k}^w \cdot W_{j,k} = a_{j+1,k}^w \cdot W_{j+1,k} + a_{j-1,k}^w \cdot W_{j-1,k} + a_{j,k+1}^w \cdot W_{j,k+1} + a_{j,k-1}^w \cdot W_{j,k-1} + b; \quad (2.19)$$

де:

$$a_{j+1,k}^w = \left(\left[-U_{j+1/2,k}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta z_{j+1/2}} \right) \cdot \Delta r_k; \quad (2.20)$$

$$a_{j-1,k}^w = \left(\left[U_{j-1/2,k}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta z_{j-1/2}} \right) \cdot \Delta r_k; \quad (2.21)$$

$$a_{j,k+1}^w = \left(\left[-V_{j,k+1/2}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta r_{k+1/2}} \right) \cdot \Delta z_j; \quad (2.22)$$

$$a_{j,k-1}^w = \left(\left[V_{j,k-1/2}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta r_{k-1/2}} \right) \cdot \Delta z_j; \quad (2.23)$$

$$\bar{S} = -W_{j,k} \cdot \frac{V_{j,k-1/2}}{r_{j,k}} \Delta r_{j,k} \Delta z_{j,k} - W_{j,k} \frac{1}{r_{j,k}^2 \cdot \text{Re}} \Delta r_{j,k} \Delta z_{j,k} + (W_{j,k+1/2} - W_{j,k-1/2}) \frac{\Delta z_{j,k}}{r_{j,k} \cdot \text{Re}};$$

$$\bar{S} = S c_{j,k} + S_{j,k} \cdot W_{j,k};$$

$$S c_{j,k} = -\frac{V_{j,k-1/2} \cdot W_{j,k}}{r_{j,k}} \cdot \Delta r_{j,k} \Delta z_{j,k} + (W_{j,k+1/2} - W_{j,k-1/2}) \cdot \frac{\Delta z_{j,k}}{r_{j,k} \cdot \text{Re}};$$

					02.15.EE2421.KPM.2026-ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

$$S_{j,k} = -\frac{\Delta r_{j,k} \cdot \Delta z_{j,k}}{\Delta r_{j,k}^2 \cdot \text{Re}}; \quad b = Sc_{j,k};$$

$$a_{j,k}^w = a_{j+1,k}^w + a_{j-1,k}^w + a_{j,k+1}^w + a_{j,k-1}^w - S_{j,k}; \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} a_{j,k}^u \cdot U_{j,k} &= a_{j+1,k}^u \cdot U_{j+1,k} + a_{j-1,k}^u \cdot U_{j-1,k} + a_{j,k+1}^u \cdot U_{j,k+1} + a_{j,k-1}^u \cdot U_{j,k-1} + b + \\ &= (P_{j,k} - P_{j+1,k}) \cdot \Delta r_{j,k}; \end{aligned} \quad (2.25)$$

де

$$a_{j+1,k}^u = \left(\left[-U_{j+1/2,k}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta z_{j+1/2}} \right) \cdot \Delta r_k; \quad (2.26)$$

$$a_{j-1,k}^u = \left(\left[U_{j-1/2,k}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta z_{j-1/2}} \right) \cdot \Delta r_k; \quad (2.27)$$

$$a_{j,k+1}^u = \left(\left[-V_{j,k+1/2}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta r_{k+1/2}} \right) \cdot \Delta z_j; \quad (2.28)$$

$$a_{j,k-1}^u = \left(\left[V_{j,k-1/2}, 0 \right] + \frac{1}{\text{Re} \cdot \delta r_{k-1/2}} \right) \cdot \Delta z_j; \quad (2.29)$$

$$\bar{S} = (U_{j,k+1/2} - U_{j,k-1/2}) \frac{\Delta z_{j,k}}{r_{j,k} \cdot \text{Re}};$$

$$\bar{S} = Sc_{j,k} + S_{j,k} \cdot U_{j,k};$$

					02.15.EE2421.KPM.2026-ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

$$Sc_{j,k} = (U_{j,k+1/2} - U_{j,k-1/2}) \frac{\Delta z_{j,k}}{r_{j,k} \cdot Re};$$

$$S_{j,k} = 0; \quad b = Sc_{j,k};$$

$$a_{j,k}^u = a_{j+1,k}^u + a_{j-1,k}^u + a_{j,k+1}^u + a_{j,k-1}^u - S_{j,k}; \quad (2.30)$$

У рівняннях дискретного аналога невідомими величинами є швидкості газу V , W , U , а також невідомим є тиск P . Тому для розв'язання цих рівнянь поле тиску повинно бути спочатку приблизно задане, а потім уточнене в процесі ітерацій. Знайдемо додаткові рівняння для корекції наближеного поля тиску, позначимо:

P^* – наближене поле тиску;

U^* , V^* – наближене поле швидкості, отримане з використанням P^* , що не задовольняє рівнянню нерозривності.

Тоді істинний тиск знаходиться зі співвідношення:

$$P = P^* + P' \quad (2.31)$$

де, P' – поправка тиску.

Аналогічно для швидкостей:

$$U = U^* + U'; \quad (2.32)$$

$$V = V^* + V';$$

Де поправки швидкостей можна розрахувати за формулами:

$$U_{j,k}^l = (P_{j,k}^l - P_{j+1,k}^l) \cdot \frac{\Delta r_{j,k}^u}{a_{j,k}^u}; \quad (2.33)$$

$$V_{j,k}^l = (P_{j,k}^l - P_{j,k+1}^l) \cdot \frac{\Delta z_{j,k}^v}{a_{j,k}^v}; \quad (2.34)$$

Уточнені швидкості:

$$U_{j,k} = U_{j,k}^* + (P_{j,k}^l - P_{j+1,k}^l) \cdot \frac{\Delta r_{j,k}^u}{a_{j,k}^u}; \quad (2.35)$$

$$V_{j,k} = V_{j,k}^* + (P_{j,k}^l - P_{j,k+1}^l) \cdot \frac{\Delta z_{j,k}^v}{a_{j,k}^v}; \quad (2.36)$$

Дискретний аналог рівняння для поправок тиску має вигляд:

$$a_{j,k} \cdot P_{j,k}^l = a_{j+1,k} \cdot P_{j+1,k}^l + a_{j-1,k} \cdot P_{j-1,k}^l + a_{j,k+1} \cdot P_{j,k+1}^l + a_{j,k-1} \cdot P_{j,k-1}^l + b; \quad (2.37)$$

де:

$$a_{j+1,k} = \frac{\Delta r_{j,k}^u \cdot \Delta r_{j,k}^p}{a_{j,k}^u}; \quad a_{j-1,k} = \frac{\Delta r_{j-1,k}^u \cdot \Delta r_{j,k}^p}{a_{j-1,k}^u};$$

$$\begin{aligned} a_{j,k+1} &= \frac{\Delta z_{j,k}^p \cdot \Delta z_{j,k}^v}{a_{j,k}^v} - \frac{\Delta z_{j,k}^p \cdot \Delta z_{j,k}^v}{a_{j,k}^v} \cdot (1 - f_{j,k}^v) \frac{\Delta r_{j,k}^p}{r_{j,k}^p} = \\ &= \frac{\Delta z_{j,k}^p \cdot \Delta z_{j,k}^v}{a_{j,k}^v} \left(1 + (1 - f_{j,k}^v) \frac{\Delta r_{j,k}^p}{r_{j,k}^p} \right); \end{aligned}$$

$$a_{j,k-1} = \frac{\Delta z_{j,k}^p \cdot \Delta z_{j,k-1}^v}{a_{j,k-1}^v} - \frac{\Delta z_{j,k}^p \cdot \Delta z_{j,k-1}^v}{a_{j,k-1}^v} \cdot f_{j,k}^v \frac{\Delta r_{j,k}^p}{r_{j,k}^p} =$$

$$= \frac{\Delta z_{j,k}^p \cdot \Delta z_{j,k-1}^v}{a_{j,k-1}^v} \left(1 - f_{j,k}^v \cdot \frac{\Delta r_{j,k}^p}{r_{j,k}^p} \right);$$

$$a_{j,k} = a_{j+1,k} + a_{j-1,k} + a_{j,k+1} + a_{j,k-1};$$

$$b = -\left(V_{j,k}^* - V_{j,k-1}^* \right) \cdot \Delta z_{j,k}^p - \left(U_{j,k}^* - U_{j-1,k}^* \right) \cdot \Delta r_{j,k}^p -$$

$$- \left(V_{j,k}^* \cdot \left(1 - f_{j,k}^v \right) + V_{j,k-1}^* \cdot f_{j,k}^v \right) \cdot \frac{\Delta r_{j,k}^p \cdot \Delta z_{j,k}^p}{r_{j,k}^p};$$

Аналогічно можна отримати дискретний аналог рівнянь для граничних умов.

Аналогічно можна отримати дискретний аналог рівнянь для граничних умов.

Отриману систему дискретизованих рівнянь руху доповнюємо відповідними граничними умовами. В наслідок дискретизації рівнянь на шаховій сітці, межа розрахункової області буде проходити або по межі контрольних об'ємів або перетинатиме їх в центральних точках.

Межевими будуть такі швидкості, як $U_{o,k}$; $U_{M,k}$; $V_{j,o}$; $V_{j,N}$; $U_{j,1/2}$; $U_{j,N+1/2}$; $V_{1/2,k}$; $V_{M+1/2,k}$; $W_{1/2,k}$; $W_{M+1/2,k}$; $W_{j,1/2}$; $W_{j,N+1/2}$, тобто значення швидкостей на гранях контрольних об'ємів, які розташовані безпосередньо на межі.

Тоді на осі симетрії для швидкості U із мови того, що похідна по радіусу дорівнює нулю:

$$\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{U_{j,1} - U_{j,1/2}}{0,5 \cdot \Delta r} = 0,$$

отримаємо, $U_{j,1/2} = U_{j,1}$, при $1 \leq j \leq M-1$

Для радіальної швидкості на осі симетрії виконується умови непротікання:

					02.15.EE2421.KPM.2026-ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$V_{j,0}=0, \text{ при } 1 \leq j \leq M;$$

Аналогічна умова виконується і для обертальної швидкості:

$$W_{j,1/2}=0, \text{ при } 1 \leq j \leq M;$$

На боковій стінці для всіх швидкостей V , U , W виконується умова прилипання:

$$U_{j,N+1/2}=0, \text{ при } 1 \leq j \leq M-1;$$

$$V_{j,N}=0, \text{ при } 1 \leq j \leq M;$$

$$W_{j,N+1/2}=0, \text{ при } 1 \leq j \leq M;$$

На вході в розрахункову область швидкості дорівнюють початковим значенням:

$$U_{0,k} = U_{0,k}^0; 1 \leq k \leq N;$$

$$V_{1/2,k} = V_{1/2,k}^0; 1 \leq k \leq N-1;$$

$$W_{1/2,k} = W_{1/2,k}^0; 1 \leq k \leq N;$$

На виході з розрахункової області значення швидкостей будуть дорівнювати:

$$U_{M,k} = U_{M,k}^k; 1 < k < N;$$

$$V_{M+1,k} = V_{M+1,k}^k; 1 < k < N-1;$$

$$W_{M+1,k} = W_{M+1,k}^k; 1 < k < N$$

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

2.2 Методика розрахунку рівноважного хімічного складу та теплообміну в реакторі

Багато авторів для визначення температур, хімічного складу й концентрації компонентів, питомих витрат енергії та інших даних в термохімічних реакторах використовують термодинамічні розрахунки.

Відомо, що термодинамічні розрахунки дозволяють одержати опис системи в стані термодинамічної рівноваги, коли всі термохімічні перетворення завершені. Цей стан є граничним і на практиці досягається при повільному русі газу.

Розрахунок рівноваги багатокомпонентної термодинамічної системи проводиться за принципом, за яким при рівновазі ентропія системи досягає свого максимуму. В результаті протікання різних хімічних реакцій можливе утворення газової S^I та твердої фаз S^{II} .

Для реакцій у газі при температурах 700...2300 К ентропія системи S , Дж/(моль·К) є сума ентропії газової фази та ентропії конденсованої (твердої) фази:

$$S = S^I + S^{II}$$

Для газової фази:

$$S^I = \sum_{i=1}^k \left[S_i^0 - \frac{1}{n_i} \int_{P_0}^{P_i} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP \right] n_i$$

Для ідеального газу з рівнянням стану $P_i V = n_i R T$ співвідношення останнє рівняння можна записати наступним чином:

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

$$S^I = \sum_{i=1}^k \left[S_i^0 - R \cdot \ln \left(\frac{R \cdot T \cdot n_i}{v P_0} \right) \right] n_i$$

де S_i^0 – стандартна ентропія i -го компонента при температурі T і тиску $P_0 = 101325$ Па;

v – питомий об'єм всієї системи, м³/кг;

$R \cdot T \cdot M_i / v = P_i$ – парціальний тиск i -го газоподібного компонента, Па;

$R = 8,314$ Дж/(моль·К) – газова стала;

n_i – вміст газоподібної компонента ($i = 1, 2, \dots, k$), моль/кг.

Для конденсованої фази:

$$S^{II} = \sum_{j=1}^m S_j^0 n_j$$

де S_j^0 – ентропія конденсованої фази ($j=1,2,\dots,m$) на 1 моль індивідуальної речовини, Дж/(моль·К);

n_j – кількість молей 1 кг робочого газу.

Значення стандартних ентропій визначалися залежно від температури.

Таким чином, необхідно знайти максимальне значення ентропії ($S \rightarrow \max$), коли координати екстремум – кількість молей окремих речовин.

Метод градієнтного спуску використано для визначення максимального значення ентропії.

Режим руху газу ламінарний. Коефіцієнт тепловіддачі розраховується за формулою:

$$\alpha_m = Nu \cdot \lambda(T_g) / d_e,$$

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

$$Nu = 1.55 \cdot \left(\frac{4m}{\pi d} \cdot \frac{c_p(T_g)}{\lambda(T_g)} \right)^{0.333} \cdot \left(\frac{\mu(T_m)}{\mu(T_w)} \right)^{0.14} \cdot \varepsilon$$

де m – витрата газу,

α_m – коефіцієнт тепловіддачі газу,

Nu – число Нусельта,

$c_p(T_g)$, $\lambda(T_g)$, $\mu(T_m)$ – теплоємність, теплопровідність і динамічна в'язкість газу при температурі T_g , $T_g = 0.5(T_m + T_w)$,

T_m – температура газу,

T_w – температура теплообмінної поверхні зі сторони газу,

$\mu(T_w)$ – динамічна в'язкість газу при температурі T_w ,

ε – поправка на ділянку гідродинамічної стабілізації,

W_m – швидкість потоку,

d_e – еквівалентний діаметр потоку газу.

$$\varepsilon = 0.6 \left(\frac{l}{Re \cdot d_e} \right)^{-1/7} \cdot \left(1 + 2.5 \frac{l}{Re \cdot d_e} \right) \text{ при } \frac{l}{Re \cdot d_e} < 0.1.$$

де Re – число Рейнольдса,

l – довжина ділянки теплообміну.

Рух повітря, що гріє, у міжтрубному просторі – турбулентний, тепловіддача для повітря визначається за формулою:

$$\alpha_a = 0.02 \cdot \frac{\lambda(T_a)}{d_{ea}} \cdot Re_a^{0.8} \cdot Pr_a^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_a}{Pr_w} \right)^{0.25}$$

де T_a – температура повітря,

$\lambda(T_a)$ – теплопровідність повітря при температурі T_a ,

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

d_{ea} – еквівалентний діаметр потоку повітря,

Re_a – число Рейнольдса для повітря,

Pr_a і Pr_w – числа Прандтля, розраховані при температурах T_a і T_w .

2.3 Методика теплового розрахунку печі для спалювання ТПВ

Зважаючи на вже сформовану у світі структуру використання ТПВ (див. рис. 1), де їх спалювання займає друге місце після захоронення 24 %, то в магістерській роботі розроблена методика теплового розрахунку печі для спалювання ТПВ продуктивністю B (т/год). Довжина печі L (мм), зовнішній діаметр печі D_n (мм), внутрішній діаметр печі (світла) D_e (мм), частота обертання печі n (об/хв), кут нахилу печі до горизонту β_0 .

Розрахунок виконуємо в наступному порядку:

1. Розрахунок горіння ТПВ;
2. Розрахунок основних параметрів печі;
3. Розрахунок зовнішнього теплообміну;
4. Розрахунок теплового балансу печі.

2.3.1 Розрахунок горіння паливної маси печі

Усереднені дані щодо елементарного складу ТПВ, теплоті згоряння визначають експериментально, а також за допомогою спеціальної літератури. Елементарний склад ТПВ залежить від морфологічного складу (папір, харчові відходи, текстиль, деревина тощо). Елементарний склад паливної маси залежить від країни, району, області в якому знаходяться ТПВ (C^r ; H^r ; O^r ; S^r ; N^r ; Q_H^r).

Задаємося зольністю A^p (%) та вологістю W^p (%) ТПВ і перераховуємо склад паливної маси на роботу:

$$k = \frac{100 - A^p - W^p}{100}$$

k – коефіцієнт перерахунку.

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Склад робочої маси ТПВ, що надходять у піч (C^p ; H^p ; O^p ; S^p ; N^p ; A^p ; W^p ; $\Sigma 100\%$).

Нижча теплота згоряння ТПВ надходять у піч:

$$Q_H^p = 339 \cdot C^p + 1030 \cdot H^p - 109 \cdot (O^p - S^p) - 25 \cdot W^p.$$

Приймаємо, що горіння починається після зони сушіння, коли вологість матеріалу становить $W_{cp} < 35\%$.

Кількість вологи, що видаляється з 1кг вологого матеріалу:

$$g_{вл} = \frac{W^p - W_c^p}{100 - W_c^p}, \text{ кг/кг}_{\text{мат}}$$

коефіцієнт перерахунку з робочої маси на суху робочу масу

$$\kappa = \frac{1}{1 - g_{вл}}.$$

Склад робочої маси після зони сушіння: C_c^p ; H_c^p ; O_c^p ; S_c^p ; N_c^p ; A_c^p ; W_c^p

Нижча теплота згоряння матеріалу після зони сушіння, кДж/кг;

$$Q_H^p = 339 * C_c^p + 1030 * H_c^p - 109 * (O_c^p - S_c^p) - 25 * W_c^p$$

Теоретично необхідна кількість повітря, м³/кг:

$$\mu = (1,5 \dots 2,5).$$

Задаємося коефіцієнтом надлишку повітря $\mu = (1,5 \dots 2,5)$. Дійсна кількість повітря:

$$L_{\partial} = \mu * L_{\partial}^0, (\text{м}^3/\text{кг}).$$

Кількість продуктів горіння (м³/кг):

$$V_{CO2} = 1,86 * C_c^p / 100$$

$$V_{H2O} = (9 * H_c^p + W_c^p) / 80,5$$

$$V_{SO2} = 0,684 * S_c^p / 100$$

$$V_{O2} = 0,21 * L_{\partial}^0 * (\mu - 1)$$

$$V_{N2} = 0,79 * \mu * L_{\partial}^0$$

					02.15.EE2421.KPM.2026-ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Тобто отримаємо відповідний склад продуктів горіння, % (CO₂; H₂O; SO₂; O₂; N₂).

Об'єм продуктів горіння:

$$V = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2}, \text{ (м}^3\text{/кг)}$$

Щільність продуктів горіння:

$$\rho_{\text{пр}} = (44 * CO_2 + 18 * H_2O + 28 * N_2 + 32 * O_2 + 64 * SO_2) / 22,4 * 100, \text{ кг/м}^3$$

Температура горіння матеріалу:

$$I_{\partial}^{\text{кал}} = \frac{Q_N^P + C_{\partial} * T_{\partial} * L_{\partial}}{V}, \text{ (кДж/м}^3\text{)}$$

$I_{\partial}^{\text{кал}}$ – тепловміст азу;

Q_N^P – нижча теплота згорання ТПВ, кДж/кг;

V – обсяг продуктів згорання, м³/кг;

C_{∂} – теплоємність повітря, що подається в піч, кДж/(кг·К);

T_{∂} – температура повітря, що подається в піч, °С;

L_{∂} – кількість повітря, що подається в піч, м³/кг.

$$I_{\partial}^{m1} = I_{\partial}^{m1} CO_2 + I_{\partial}^{m1} H_2O + I_{\partial}^{m1} N_2 + I_{\partial}^{m1} O_2 + I_{\partial}^{m1} SO_2;$$

$$I_{\partial}^{m2} = I_{\partial}^{m2} CO_2 + I_{\partial}^{m2} H_2O + I_{\partial}^{m2} N_2 + I_{\partial}^{m2} O_2 + I_{\partial}^{m2} SO_2;$$

$I_{\partial}^{m1}, I_{\partial}^{m2}$ – тепловміст газів при даних температурах, кДж/м³.

За допомогою інтерполяції визначаємо калориметричну температуру горіння матеріалу:

$$T_{\text{кал}} = T_{I_{\partial}^{m1}} + 100 \frac{I_{\partial}^{\text{кал}} - I_{\partial}^{m1}}{I_{\partial}^{m2} - I_{\partial}^{m1}}$$

Дійсна температура продуктів згорання:

$$T_{\partial} = T_{\text{кал}} * \eta$$

η – пірометричний коефіцієнт (0,4...0,7 - для топків повністю екранованих; 0,75...0,9 - екранованих у верхній частині; 0,9 - виносних).

2.3.2 Расчет основных параметров печи

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Кутова швидкість обертання печі:

$$\omega = 2 * \pi * n$$

n – швидкість обертання барабана, об/с;

Швидкість руху матеріалу вздовж печі

$$W_{\partial} = \frac{D_{вн} * \omega * tg\beta}{2 * sin\theta}$$

$D_{вн}$ – внутрішній діаметр барабана (м);

ω – кутова швидкість обертання барабана (рад/с);

β – кут нахилу барабана до горизонту (град);

θ – кут тертя матеріалу про стінки (град);

Коефіцієнт заповнення печі

$$\psi = \frac{4 * B}{3600 * \pi * (D_{вн})^2 * \rho * W_{\partial}};$$

B – продуктивність печі (кг/год);

ρ – густина матеріалу (кг/м³);

W_{∂} – швидкість руху матеріалу (м/с);

Час перебування матеріалу у печі

$$\tau_{общ} = \frac{L}{W_{\partial}};$$

$\tau_{общ}$ – час (сек.);

L – довжина печі (м);

W_{∂} – швидкість руху матеріалу у печі (м/с);

2.3.3 Розрахунок зовнішнього теплообміну

Площа перерізу, заповнена топковими газами, м²:

$$F_{сеч} = \frac{\pi * (D_{вн})^2}{4} - \frac{R_{вн}^2}{2} * \left(\frac{\pi * 2 * \theta}{180} - sin(2 * \theta) \right)$$

Вологовміст газів у зоні горіння:

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$d = \frac{1000 * G_n}{G_{c.2}}, \text{ м/кг}$$

G_n – вага водяної пари при спалюванні палива (кг/кг);

$G_{c.2}$ – вага сухих газів палива, що спалюється (кг/кг.с.г.);

$$G_n = \frac{9 * H_c^p + W_c^p}{100};$$

$$G_{c.2} = 1 + \alpha * L_v^o - \frac{A_c^p + 9 * H_c^p + W_c^p}{100}$$

Кількість випарованої вологи, кг/год.:

$$W_{вл} = B * \frac{W_c^p - W_k}{100 - W_k},$$

B – продуктивність печі (кг/год);

W_c^p – вологість ТПВ після зони сушіння (%);

W_k – кінцева вологість ТПВ (%).

Коефіцієнт випромінювання в зоні випаровування:

$$\alpha_{луч} = \frac{\sigma * [(\frac{T_d + 273}{100})^4 - (\frac{T_m + 273}{100})^4]}{T_d - T_m},$$

σ – наведений коефіцієнт випромінювання (Вт/м²·К⁴);

$$\sigma = \sigma_0 \varepsilon; \text{ (Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

$\sigma_0 = 5,76$ коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

ε – ступінь чорноти системи (газ-кладка-матеріал);

T_d – температура газу (0С);

T_m – температура поверхні матеріалу (0С).

Вологовміст газів у зоні горіння:

$$d = \frac{1000 * G_n}{G_{c.2}}, \text{ м/кг}$$

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

G_n – вага водяної пари при спалюванні палива (кг/кг);

$G_{c.2}$ – вага сухих газів палива, що спалюється (кг/кг.с.г.);

$$G_n = \frac{9 * H_c^p + W_c^p}{100};$$

$$G_{c.2} = 1 + \alpha * L_v^o - \frac{A_c^p + 9 * H_c^p + W_c^p}{100}$$

Кількість випарованої вологи, кг/год.:

$$W_{вл} = B * \frac{W_c^p - W_k}{100 - W_k},$$

B – продуктивність печі (кг/год);

W_c^p – вологість ТПВ після зони сушіння (%);

W_k – кінцева вологість ТПВ (%).

Коефіцієнт випромінювання в зоні випаровування:

$$\alpha_{луч} = \frac{\sigma * [(\frac{T_{\partial} + 273}{100})^4 - (\frac{T_m + 273}{100})^4]}{T_{\partial} - T_m},$$

σ – наведений коефіцієнт випромінювання (Вт/м²*К⁴);

$$\sigma = \sigma_0 * \varepsilon;$$

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

[8].

ε – ступінь чорноти системи (газ-кладка-матеріал);

T_{∂} – температура газу (°С);

T_m – температура поверхні матеріалу (°С);

Ефективна середня довжина променя:

$$S_{ef} = \frac{3,6 * V_2}{F},$$

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

V_2 – об'єм камери займаний газами (м^3);

$$F = F_{kl} + F_m$$

F_{kl} – площа кладки (м^2);

F_m – площа матеріалу (м^2);

$$F_{kl} = \pi * D_{вн} - \frac{\pi * R_{вн} * 2 * \theta}{180}.$$

Сила поглинання:

$$C_{co2} = P_{co2} * S_{эф} * 98,1; \text{ (кН/м)}$$

$$C_{h2o} = P_{h2o} * S_{эф} * 98,1; \text{ (кН/м)}$$

C_{co2}, C_{h2o} – сила поглинання.

Залежно від температури газу та добутку парціальних тисків за графіками в спеціальній літературі визначаємо ступінь чорноти газів CO_2 та H_2O .

Ступінь чорноти газу:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{co2} + \varepsilon_{h2o} * \beta;$$

β – коефіцієнт визначається за графіком;

ε_{co2} – ступінь чорноти CO_2 ;

ε_{h2o} – ступінь чорноти H_2O ;

Ступінь чорноти системи (газ- кладка-матеріал):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_m * \varepsilon_g * [1 + \varphi * (1 - \varepsilon_g)]}{\varepsilon_g + \varphi(1 - \varepsilon_g)[1 - (1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_m)]};$$

кутовий коефіцієнт:

$$\varphi = \frac{F_m}{F_{kl}};$$

ε_m – ступінь чорноти матеріалу.

Вихід сухого матеріалу:

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

$$B_m^c = B - W_{вл}, \text{ (кг/год);}$$

B – продуктивність печі (кг/год);

$W_{вл}$ – кількість випарованої вологи (кг/год).

Вихід димових газів

$$B_d = B_m^c * V \text{ (м}^3\text{/год)}$$

V – обсяг продуктів згоряння (м³/кг);

Вихід утворює шлаку

$$B_{шл} = B_m^c * \frac{A_c^p}{100}, \text{ (кг/год);}$$

A_c^p – зольність матеріалу (%).

Початкова швидкість димових газів

$$W_{dg} = \frac{B_d}{F_{сеч}} (1 + \beta * T_{\partial}), \text{ (м/год);}$$

$$\beta = \frac{1}{273};$$

T_{∂} – температура газу (0С);

Число Нуссельта:

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8};$$

$$Re = \frac{W_{dg} * D_{вн}}{\nu * 3600} \text{ – число Рейнольдса,}$$

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу (м²/с);

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією

$$\alpha_k = \frac{Nu * \lambda}{D_{вн}}, \text{ (Вт/м}^2\text{·К);}$$

λ – коефіцієнт теплопровідності газу, Вт/(м·К);

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{луч} + \alpha_k, \text{ (Вт/м}^2\text{·К);}$$

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Тепло, витрачене на випаровування рідини:

$$Q_{ис} = \frac{W_{вл} * g}{3600}, \text{ (кВт)};$$

$$g = 2258 \text{ (кДж/кг)};$$

$$Q_{ис} = \alpha_{\Sigma} * F(T_{\partial} - T_m);$$

$$F = \frac{Q_{ис}}{\alpha_{\Sigma}(T_{\partial} - T_m)} - \text{площа поверхні матеріалу (м}^2\text{)}.$$

Довжина ділянки випаровування

$$l = \frac{F}{\delta}, \text{ (м)};$$

δ – товщина матеріалу (ТПВ) у печі (м).

Час нагрівання матеріалу:

$$\tau = \frac{1}{1-W} * \frac{S * \rho * C_m}{\alpha} * \ln \frac{T_{\partial} - T_H}{(T_{\partial} - T_H) - (1-W)(T_K - T_H)}, \text{ (с)};$$

$$W = \frac{B^c * C_m}{B_d * C_d} - \text{водяне число};$$

S – товщина шару матеріалу у печі (м);

ρ – густина матеріалу (кг/м³);

C_m – теплоємність матеріалу (Дж/кг·К);

C_d – теплоємність газу (Дж/м³·К);

α – сумарний коефіцієнт тепловіддачі (Вт/м²·К);

T_{∂} – температура газу (°С);

T_H – початкова температура ТПВ, (°С);

T_K – кінцева температура ТПВ (°С);

$$C_d = 0,01(CO_2 * C_{CO_2} + H_2O * C_{H_2O} + N_2 * C_{N_2} + O_2 * C_{O_2}),$$

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$C_{co2}, C_{h2o}, C_{n2}, C_{o2}$ – теплоємність газів (кДж/м³К).

Довжина ділянки нагріву

$$l_H = W_D * \tau, (м);$$

W_D – швидкість руху матеріалу (м/с);

τ – час нагріву (с).

2.3.4 Розрахунок теплового балансу

Довжина ділянок сушіння + нагрівання

$$L_{\Sigma} = l + l_H, (м)$$

Розрахуємо тепловий баланс. Надходження тепла.

Теплота від горіння відходів:

$$Q_{хим} = \frac{B_m^c * Q_H^p}{3600} \text{ (кВт);}$$

B_m^c – продуктивність печі за сухим матеріалом (кг/год);

Q_H^p – нижча теплота згоряння матеріалу (кДж/кг);

Тепло, що вноситься підігрітим повітрям:

$$Q_{\epsilon} = \frac{B_m^c * L_D * C_{\epsilon} * T_{\epsilon}}{3600}, \text{ (кВт);}$$

L_D – кількість повітря, що подається (м³/кг);

C_{ϵ} – теплоємність повітря (кДж/м³К);

T_{ϵ} – температура повітря (0С);

Витрата тепла на випаровування вологи:

$$Q_{ис} = \frac{W_{вл} * g}{3600}, \text{ (кВт);}$$

$g = 2258$ (кДж/кг), теплота пароутворення;

$W_{вл}$ – кількість випарованої вологи (кг/год);

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Витрата тепла на нагрівання матеріалу:

$$Q_n = \frac{B_m^c * C_m (T_k - T_n)}{3600} \text{ (кВт);}$$

T_n – початкова температура ТПВ ($^{\circ}\text{C}$);

T_k – кінцева температура ТПВ ($^{\circ}\text{C}$);

C_m – теплоємність ТПВ (кДж/кгК);

Втрати фізичної теплоти зі шлаком:

$$Q_{шл} = \frac{B_{шл} * C_{шл} * T_{шл}}{3600} \text{ (кВт);}$$

$B_{шл}$ – кількість шлаку, що утворюється (кг/год);

$C_{шл}$ – теплоємність шлаку (кДж/кгК), [2];

$$C_{шл} = (0,1709 + 0,00336 \sqrt{52 + T_{шл}}) * 4,187;$$

$T_{шл}$ – температура шлаку ($^{\circ}\text{C}$);

Втрати теплоти з відхідними газами:

$$Q_{yx} = \frac{B_d * C_d * T_d^{yx}}{3600} \text{ (кВт);}$$

T_d^{yx} – температура газів, що йдуть ($^{\circ}\text{C}$);

B_d – кількість газу, що утворюється (м³/год);

C_d – теплоємність газу (кДж/м³* $^{\circ}\text{C}$);

Втрати теплоти з хімічним недопалом відходів:

$$Q_{xn} = \frac{23600 \frac{C}{100} CO}{(CO_2 + CO)} * \frac{B_m^c}{3600} \text{ (кВт);}$$

C – вміст вуглецю у відходах (%);

CO – вміст оксиду вуглецю в продуктах згоряння (0,1...0,01), (%);

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

CO_2 – вміст діоксиду вуглецю в продуктах згоряння (%);

Втрати теплоти з механічним недопалом:

$$Q_{MH} = \frac{\Pi * Q_H^P * B_m^C}{3600} \text{ (кВт)};$$

Π – втрати палива рівні (0,05 ... 0,06);

B_m^C – продуктивність печі за сухим матеріалом (кг/год);

Q_H^P – нижча теплота згоряння матеріалу (кДж/кг);

Втрати теплоти через кладку [4]:

$$Q_{кл} = \frac{T_{кл} - T_o}{\sum \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha_o}} * F_{кл} * 10^{-3} \text{ (кВт)};$$

$T_{кл}$ – температура внутрішньої поверхні кладки (0С);

T_o – температура довкілля (0С);

S – товщина відповідного шару (м);

λ – коефіцієнт теплопровідності шару (Вт/м*0С);

α – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішнього джерела тепла (Вт/м²*0С);

α_o – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої кладки (Вт/м²*0С);

$$\alpha_o = 1,163(8 + 0,05 * T_{н.кл}), \text{ (Вт/м}^2\text{К)};$$

$T_{н.кл}$ – температура зовнішньої поверхні печі (0С);

Температура внутрішньої поверхні кладки:

$$\phi_{кл} = \frac{\theta_1^4 - \theta_2^4}{1 - \theta_2^4};$$

$$\phi_{кл} = \frac{\varepsilon_g [1 + \phi(1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_m)]}{\varepsilon_g + \phi(1 - \varepsilon_g)[1 - (1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_m)]};$$

ε_m – ступінь чорноти матеріалу;

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

φ – кутовий коефіцієнт;

$$\varphi = \frac{F_m}{F_{kl}};$$

ε_g – ступінь чорноти газу;

$$\theta_1 = \frac{T_{kl} + 273}{T_\partial + 273};$$

$$\theta_2 = \frac{T_m + 273}{T_\partial + 273};$$

T_m – температура поверхні ТПВ ($^{\circ}\text{C}$);

T_{kl} – температура внутрішньої поверхні кладки ($^{\circ}\text{C}$);

T_∂ – температура газу ($^{\circ}\text{C}$);

$$\theta_1 = \sqrt[4]{\theta_2^4 + \varphi_{kl}(1 - \theta_2^4)};$$

$$T_{kl} = (T_\partial * \theta_1) - 273;$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_g * \varepsilon_{kl} [1 + \varphi(1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_m)]}{1 - (1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_{kl})[\varphi_1 + \varphi(1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_m)]};$$

ε_1 – ступінь чорноти системи газ-кладка;

ε_{kl} – ступінь чорноти кладки;

φ_1 – кутовий коефіцієнт

$$\varphi_1 = 1 - \frac{F_m}{F_{kl}};$$

Середні температури шарів кладки:

При тришаровій кладці температура проміжного шару

$$t_2 = \frac{T_{kl} + T_o}{2} \text{ (}^{\circ}\text{C)};$$

середня температура внутрішнього шару

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

$$t_1 = \frac{T_{kl} + t_2}{2} \text{ (}^\circ\text{C)};$$

середня температура зовнішнього шару

$$t_3 = \frac{t_2 + T_o}{2} \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Значення коефіцієнтів теплопровідності, Вт/мК, визначається залежно від матеріалу та середньої температури шару. Після визначення величини слід перевірити правильність прийнятих значень середніх температур шарів.

Температури підраховуються так:

$$t_1' = T_{kl} - \frac{Q_{кл} * S_1}{2 * F_{кл} * \lambda_1};$$

$$t_2' = T_{kl} - \frac{Q_{кл}}{2 * F_{кл}} \left(\frac{2 * S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} \right);$$

$$t_3' = T_{kl} - \frac{Q_{кл}}{2 * F_{кл}} \left(\frac{2 * S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} \right);$$

Для практичних розрахунків можна вважати допустимим розбіжність між прийнятими значеннями середніх температур шарів та підрахованими за формулами в межах до 20%.

Перевіряємо температуру зовнішньої поверхні печі

$$T_{н.кл} = T_o + \frac{q}{\alpha_o};$$

T_o – температура довкілля ($^\circ\text{C}$);

q – питомі теплові втрати через кладку (Вт/м^2);

Температуру газів, що відходять, визначаємо з рівняння теплового балансу.

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

3. ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ПАЛИВ І УМОВ ЙОГО ОТРИМАННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

3.1 Результати розрахунку рівноважного хімічного складу палива, яке збагачене воднем

Розрахунки виконані для біогазу, який має середній склад (таблиця 3.1):

Таблиця 3.1 – Склад біогазу

Хімічна формула	Об'ємна частка	S_i^0 (при $T=298,15$ К), Дж/(моль·К)
CH ₄	0.53	186,192
CO ₂	0.45	213,576
H ₂ S	0.19	205,728
O ₂	0.01	205,026

Результати расчетов впливу температури та тиску на рівноважний хімічний склад продукту перетворення приведені на рисунках 3.1–3.4.

Из расчетов следует, что с увеличением температуры до $T=1100$ К (тиск $P=0,1$ МПа) рівноважний об'ємний вміст водню (r_{H_2}) та оксиду вуглецю (r_{CO}) в газі швидко збільшується, потім швидкість зростання різко зменшується з досягненням максимуму об'ємної частки водню в інтервалі 1300...2000 К (див. рис. 3.1–3.2). Зворотна тенденція спостерігається для інших газових компонентів та масової частки твердої фази вуглецю (див. рис. 3.3–3.4).

Збільшення тиску зменшує кількість утвореного водню та оксиду вуглецю.

Масова частка твердого вуглецю зі збільшенням температури швидко зменшується з 23 % до менше 5 % при 700...1100 К (тиск $P=0,1$ МПа). Мінімальна кількість твердого вуглецю (сажи) та водяної пари збільшує надійність роботи реактора.

Якщо для даного початкового хімічного складу обрати раціональну температуру 1100 К, то конструктивно реактор може бути виготовлений з термостійкої сталі, яка містить легуючі елементи (нікель, хром, алюміній, кремній) і яка має рекомендовану температуру використання до 1300 К і більше або з іншого термостійкого матеріалу (наприклад з металокераміки, графіту). Також існують промислові системи терморегуляції, які побудовані на основі термопар (тип К, N, R...), які розраховані на такі температури.

Промислове застосування отриманих результатів роботи може бути визначено після всебічного техніко-економічного аналізу з урахуванням всіх екологічних факторів. Також необхідно відзначити, що на фактичну раціональну температуру отримання водню впливатиме кінетика хімічних реакцій, апаратурна реалізація реактору, наявність каталізаторів процесу, можливість забруднення сажею поверхонь теплообміну.

В [13] наведено техніко-економічний аналіз багатьох різних технологій виробництва водню. Найбільш дешевий водень отримується за класичною технологією риформінгу природного газу за ціною от 0,92 до 2,8 євро/кгН₂ (2021 рік). Ціна водню, який отримано шляхом електролізу складає від 6,6 до 7,9 євро/кгН₂ (2021 рік) в залежності від типу технології електролізеру. За прогнозами, в 2050 году зелений водень може вироблятися по ціні 2,5–3,5 євро/кгН₂ в більшості країн ЄС. При оптимізації виробництва приблизна ціна водню з біогазу шляхом сухого риформінгу метану складає 1.29 євро/кгН₂. [13], [29]

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Для фіксації кінцевого складу речовин отриманих в реакторі потрібне швидке охолодження продуктів реакцій ("закалювання") в охолоджувачі, а для більшої економічної ефективності необхідна рекуперация теплоти.

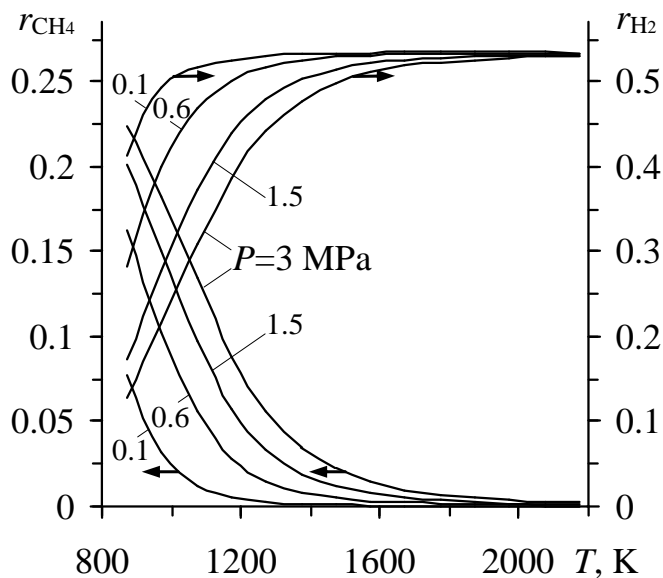


Рисунок 3.1 – Об'ємна частка CH_4 та H_2

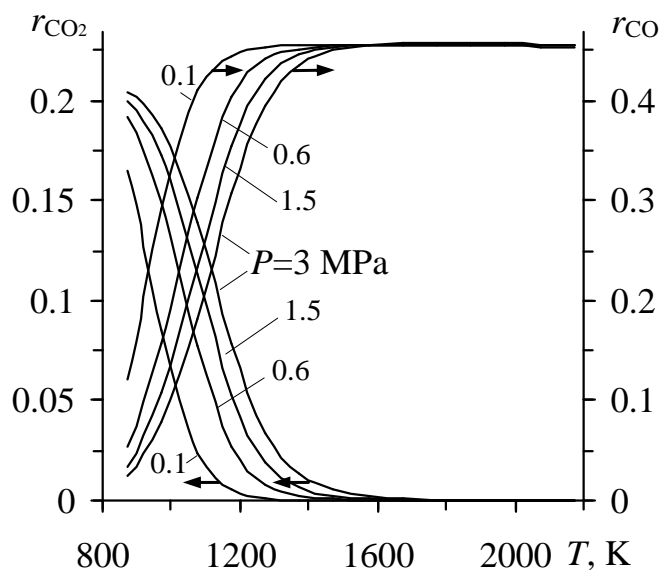


Рисунок 3.2 – Об'ємна частка CO_2 та CO

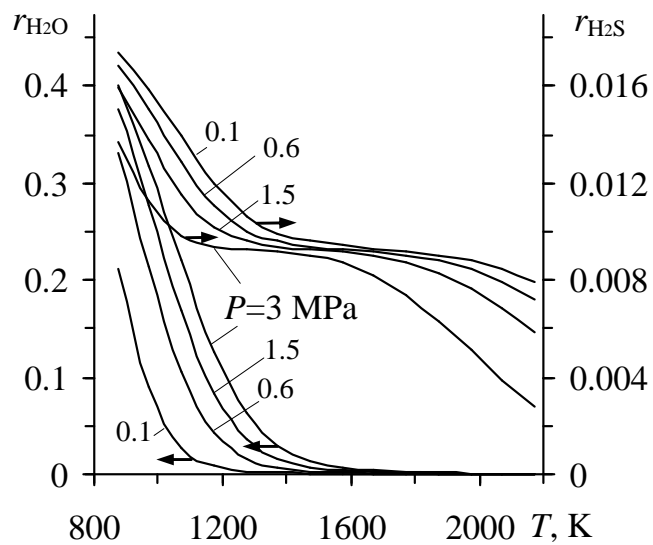


Рисунок 3.3 – Об'ємна частка H₂O та H₂S

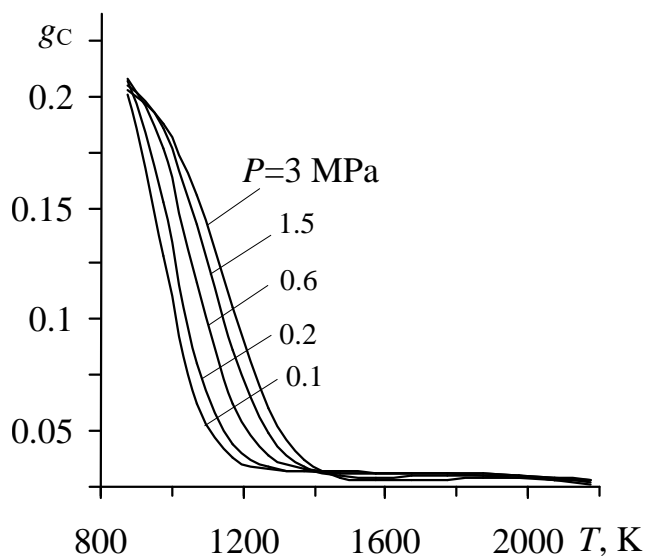


Рисунок 3.4 – Масова частка твердого вуглецю

3.2 Результати розрахунку газодинамічних характеристик реактора

Результати розрахунку газодинамічних характеристик реактора наведено на рисунку 3.5–3.7

З графіків випливає, що осьова швидкість (див. рис. 3.5) на вході в піч має менші значення біля осі, збільшується зі збільшенням радіусу і досягає максимуму, а потім зменшується до нуля на стінці. Зі збільшенням відстані від входу профіль швидкості вирівнюється, значення швидкості біля осі збільшуються. Для відстані $z \approx 1,2$ максимум осьової швидкості досягається на осі симетрії. Надалі, зі збільшенням $z \approx 2,44$ розподіл швидкостей практично не змінюється.

Перебудова профілю швидкості початковій ділянці призводить до появи радіальної швидкості (див. рис. 3.6). Відтік від стінок зменшується зі збільшенням відстані від входу в піч і прагне нуля, коли профіль швидкості не змінюється.

Обертальна швидкість потоку (див. рис. 3.7) максимальна біля входу до піч, тобто. після завихрювача. Зі збільшенням відстані від входу обертальна швидкість зменшується і при $z > 2,44$ практично дорівнює нулю

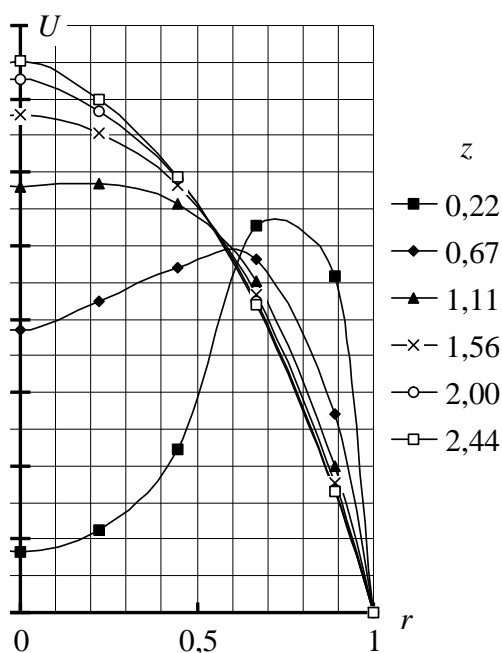


Рисунок 3.5 – Осьова швидкість

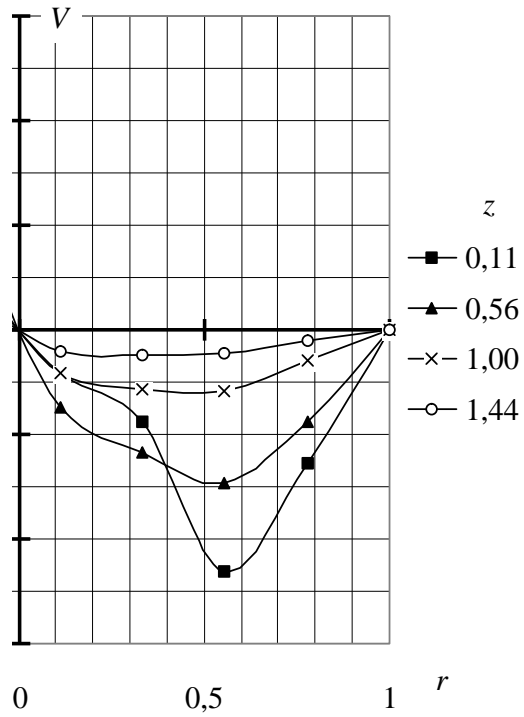


Рисунок 3.6 – Радіальна швидкість

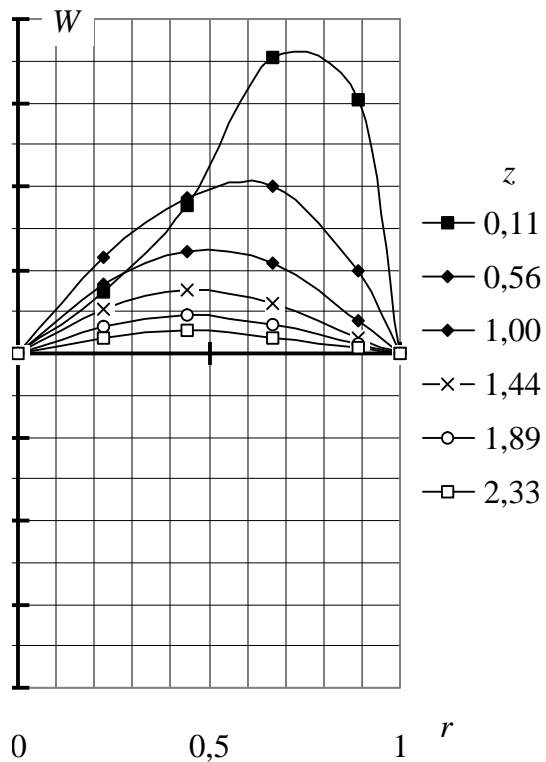


Рисунок 3.7 – Обертальна швидкість

ВИСНОВКИ

В роботі побудована математична модель руху газу в реакторі енергоперетворення ТПВ на паливо та метод розрахунку хімічного складу отриманого палива, на виході з реактора. яке збагачене воднем

Розв'язок рівнянь математичної моделі отримано чисельним методом з використанням алгоритму SIMPLE. В результаті чисельного рішення на ЕОМ отримані профілі осьової, радіальної та обертальної швидкості газу в реакторі при наявності початкової закрутки потоку.

Показано, що закручування потоку на вході суттєво впливає на профіль осьової, радіальної та обертальної швидкостей на початковій ділянці реактора. Визначено зони мінімуму і максимуму швидкостей газу та ділянки її стабілізації.

Розрахунок хімічного складу отриманого палива в реакторі дозволило визначити температури в реакторі, коли утворюється газ з максимальним вмістом водню. Визначено параметри термодинамічної системи, яка визначально складалась з біогазу ТПВ, при температурах 873,2...2273,2 К і тиску 0,1...3 МПа.

В результаті розрахунків отримано, що при тиску 0,1 МПа та температурах 1300...2000 К утворюється слабовиразний максимум утворення водню. Рациональною температурою буде нагрівання буде ≈ 1100 К коли її перевищення майже не впливає на зміну об'ємних концентрацій хімічних складових, а масова доля утвореного вуглецю складає ≈ 5 %.

Отримані результати мають практичну цінність при проектуванні нових зразків реакторів для енергоперетворення ТПВ на паливо.

					02.15.ЕЕ2421.КРМ.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. United Nations Environment Programme, International Solid Waste Association. (2024). *Global Waste Management Outlook 2024*. Nairobi: UNEP. DOI: <https://doi.org/10.18356/9789210027596> (дата звернення: 11.09.2025)
2. Eurostat. (2025). *Municipal waste statistics*. Luxembourg: European Commission. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics (дата звернення: 11.11.2025)
3. Li J. (2024). A review of the physical and chemical characteristics of municipal solid waste incineration fly ash in China. *Energies*, 17(2), 491. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17020491> (дата звернення: 01.10.2025)
4. European Environment Agency. (2024). *Recycling in Europe: Trends and prospects 2025*. Copenhagen: EEA. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/waste-recycling> (дата звернення: 01.10.2025)
5. Ecoprog GmbH. (2024). *Waste to Energy 2024/2025 (17th ed.)*. Cologne: ecoprog GmbH. URL: <https://www.ecoprog.com/waste-to-energy-report> (дата звернення: 01.10.2025)
6. Zhevzyk, O., Potapchuk, I., Bosyi, D., Castro-Santos, L., Rezyk, D. A., & Holenko, D. (2025, June). Thermochemical Analysis of Maximizing Hydrogen Production from Biogas Through Thermal Decomposition. In *2025 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)* (pp. 741-743). IEEE. DOI: [10.1109/ICCEP65222.2025.11143729](https://doi.org/10.1109/ICCEP65222.2025.11143729) (дата звернення: 01.10.2025)
7. Financial Times. (2025, September 14). *China running out of rubbish to burn as waste power goes into overdrive*. URL: <https://www.ft.com/content/28d8d39e> (дата звернення: 01.10.2025)
8. Sun H., Zhang Y., Liu J., et al. (2024). *An integrated assessment of municipal solid waste incineration in China: environmental and economic perspectives*. *Sustainability*, 16(7), 3254. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16073254> (дата звернення: 01.10.2025)

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

9. Communication From the Commission to the European Parliament, The European Council, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of The Regions the European Green Deal COM/2019/640 final

10. Communication From the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee And The Committee Of The Regions Brussels, 8.7.2020 COM (2020) 301

11. Fanhe Kong, Jordan Swift, Qiaochu Zhang, Liang-Shih Fan, & Andrew Tong. (2020). Biogas to H₂ conversion with CO₂ capture using chemical looping technology: Process simulation and comparison to conventional reforming processes. *Fuel*, 279, 118479. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118479> (дата звернення: 01.10.2025)

12. ДБН В.2.4-2-2005 "Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування" із Зміною №1 та Зміною №2.

13. Hajizadeh, A., Mohamadi-Baghmolaei, M., Saady, N. M. C., & Zندهboudi, S. (2022). Hydrogen production from biomass through integration of anaerobic digestion and biogas dry reforming. *Applied energy*, 309, 118442. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118442> (дата звернення: 03.10.2025)

14. Akhlaghi, N., & Najafpour-Darzi, G. (2020). A comprehensive review on biological hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 22492-22512. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.182> (дата звернення: 03.10.2025)

15. Mudhoo, A., Forster-Carneiro, T., & Sánchez, A. (2011). Biohydrogen production and bioprocess enhancement: a review. *Critical reviews in biotechnology*, 31(3), 250-263. URL: <https://doi.org/10.3109/07388551.2010.525497> (дата звернення: 03.10.2025)

16. Singh, A., Sevda, S., Abu Reesh, I. M., Vanbroekhoven, K., Rathore, D., & Pant, D. (2015). Biohydrogen production from lignocellulosic biomass: technology and sustainability. *Energies*, 8(11), 13062-13080. URL: <https://doi.org/10.3390/en81112357> (дата звернення: 03.10.2025)

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

17. Rey, J. R. C., Mateos-Pedrero, C., Longo, A., Rijo, B., Brito, P., Ferreira, P., & Nobre, C. (2024). Renewable Hydrogen from Biomass: Technological Pathways and Economic Perspectives. *Energies*, 17(14), 3530. URL: <https://doi.org/10.3390/en17143530> (дата звернення: 03.10.2025)

18. Shahbaz, M., Al-Ansari, T., Aslam, M., Khan, Z., Inayat, A., Athar, M., ... & McKay, G. (2020). A state of the art review on biomass processing and conversion technologies to produce hydrogen and its recovery via membrane separation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(30), 15166-15195. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.009> (дата звернення: 03.10.2025)

19. Bulat, A., Kholiavchenko, L., Oparin, S., Davydov, S., Zhevzhyk, O., & Potapchuk, I. (2022). Energy of low-temperature plasma in the processes of thermal conversions of carbon-containing medium. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 970, No. 1, p. 012050). IOP Publishing. URL: <https://doi:10.1088/1755-1315/970/1/012050> (дата звернення: 03.11.2025)

20. Zhevzhyk, O., Kholiavchenko, L., Davydov, S., Potapchuk, I., Kabakova, L., Gupalo, O., ... & Morozova, N. (2020). Mathematical modeling of heating of coal particle within the space between electrodes of arc-heating reactor. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 168, p. 00069). EDP Sciences. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800069> (дата звернення: 03.11.2025)

21. Yang, S., Kong, Q., Zeng, D. et al. Simulation research of a counter-flow rotary kiln hazardous waste incineration system. *Int J Coal Sci Technol* 9, 60 (2022). URL: <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00523-y> (дата звернення: 03.11.2025)

22. Pichler M, Haddadi B, Jordan C, Norouzi H, Harasek M. Dataset for the simulated biomass pyrolysis in rotary kilns with varying particle residence time distributions. *Data Brief*. 2021 Nov 23;39:107603. URL: <https://doi:10.1016/j.dib.2021.107603>. PMID: 34877378; PMCID: PMC8633881 (дата звернення: 05.11.2025)

23. Cecilio D.M., Mateus M., Ferreiro A.I. Industrial Rotary Kiln Burner Performance with 3D CFD Modeling. *Fuels* 2023, 4, 454-468. URL: <https://doi.org/10.3390/fuels4040028> (дата звернення: 05.12.2025)

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

24. H. Khodaei, C. Blvarez-Bermudez, S. Chapela, C. Olson, M.D. MacKenzie, M.A. Gymez, J. Porteiro, Eulerian CFD simulation of biomass thermal conversion in an indirect slow pyrolysis rotary kiln unit to produce biochar from recycled waste wood, *Energy*, Volume 288, 2024, 129895, URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129895> (дата звернення: 05.12.2025)
25. Wang, M.; Jia, T.; Song, X.; Yin, L.; Chen, D.; Qian, K. CFD–DEM Simulation of Heat Transfer and Reaction Characteristics of Pyrolysis Process of MSW Heated by High-Temperature Flue Gas. *Processes* 2024, 12, 390. URL: <https://doi.org/10.3390/pr12020390> (дата звернення: 15.12.2025)
26. Loitsyanskii, L.G. (1966). *Mechanics of Liquids and Gases, International Series of Monographs in Aeronautics and Astronautics. (Vols 6)*
27. Patankar S. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York: Hemisohere Publishing Corporation, 1980. p. 197.
28. Koval V.P. (1989). Sovershenstvovanye enerhetycheskykh apparatov s vykhrevoi kameroi. [Improvement of energy devices with a vortex chamber]. *Doctor's thesis*. Dnipropetrovsk [in Ukrainian].
29. Biogas-Messprogramm II – 61 Biogasanlagen im Vergleich“ /Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Hofplatz 1, 18276 Gülzow

					02.15.EE2421.KPM.2026–ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56