

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ БІОМАСИ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА В МАЛОПОТУЖНИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми навчання
освітнього ступеня «Магістр», освітньо-
професійної програми «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ **Ярослав ВИСОЧАНСЬКИЙ**

Керівник: кандидат технічних наук, доцент

_____ **Олександр КОЗАК**

Оцінка захисту:

Національна шкала _____
Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

«___» _____ 2025 р.

Гарант освітньої програми «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка» спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент _____ **Павло ПОТАПСЬКИЙ**

м. Кам'янець-Подільський, 2025р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ІНТЕГРАЦІЯ БІОПАЛИВА ЯК СТРАТЕГІЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЕРРЕХОДУ: ВИЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАМІЩЕННЯ ВИКОПНОГО ПАЛИВА	16
1.1 Процес генерації теплової енергії шляхом використання різноманітних видів палива біологічного походження (біопалива).....	16
1.1.1 Біологічне паливо (біопаливо) в твердій формі	16
1.1.2 Біологічне паливо (біопаливо) в рідкій формі	30
1.2 Питання та обмеження, що виникають при застосуванні газоподібного палива	34
1.3 Газоподібне паливо з альтернативних джерел	35
1.3.1 Дослідницька робота, присвячена спалюванню синтетичного паливного газу (синтез-газу).....	36
Висновок до розділу 1	47
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНИ ОГЛЯД CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ БІОЛОГІЧНОГО ПАЛИВА.	48
2.1 Характерні риси моделювання процесів з твердим біопаливом	48
2.2 Обчислювальний підхід, застосований до розробленої CFD-моделі.....	69
Висновок до розділу 2.....	71
РОЗДІЛ 3. МЕТОДОЛОГІЯ CFD АНАЛІЗУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ БІОПАЛИВА	73
3.1 Математичне представлення (опис) процесів, що відбуваються в котельному агрегаті.....	73
3.2 Характеристики біопалива, необхідні для інженерних (чисельних) розрахунків	77
Висновок до розділу 3.....	83

РОЗДІЛ 4. ДАНІ, ОТРИМАНІ В ХОДІ CFD МОДЕЛЮВАННЯ СПАЛЮВАННЯ БІОЛОГІЧНОГО ПАЛИВА.	85
4.1 Дані розрахунку згоряння біопалива у котельному агрегаті.....	85
4.2 Встановлення ККД котла для режиму роботи з досліджуваним видом біопалива (пелетами)	94
Висновок до розділу 4.....	103
ВИСНОВКИ.....	105
СПИСОК ВИКОРИСТАНОХ ДЖЕРЕЛ.....	107

АНОТАЦІЙ

Ця кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра, "Оптимізація використання біомаси як альтернативного палива в малопотужних котельних установках", присвячена критично важливій проблемі заміщення традиційних джерел енергії біопаливом.

Актуальність роботи зумовлена визнанням біомаси ключовим відновлюваним енергоресурсом. Вона є важливим інструментом декарбонізації та має суттєво менший вуглецевий слід порівняно з викопним паливом, що підтверджує її значний потенціал як альтернативного джерела енергії для опалення.

Основна мета полягала у розробці математичної моделі для імітації (симуляції) процесу горіння пелетного біопалива у побутовому водогрійному котлі.

ANNOTATION

This qualification work for a Master's degree, titled "Optimisation of the use of biomass as an alternative fuel in low-power boiler plants" is dedicated to the critically important issue of replacing traditional energy sources with biofuel.

The relevance of the work is determined by the recognition of biomass as a key renewable energy resource. It is an important tool for decarbonization and has a significantly smaller carbon footprint compared to fossil fuels, which confirms its considerable potential as an alternative energy source for heating.

The primary goal was to develop a mathematical model for simulating the combustion process of pelletized biofuel in a domestic hot water boiler.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра **"ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ БІОМАСИ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА В МАЛОПОТУЖНИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ"**, присвячена актуальній проблемі заміщення традиційних енергоносіїв біопаливом.

Об'єкт дослідження: Процеси горіння твердого біопалива та утворення шкідливих викидів у водогрійному котлі потужністю 95 кВт.

Основна мета роботи: Полягала у створенні математичної моделі для симуляції горіння пелетного біопалива у побутовому котлі. Це дозволило детально дослідити його енергетичні та екологічні характеристики. На основі отриманих даних та із залученням спеціалізованого програмного забезпечення, надано практичні рекомендації щодо доцільності використання біопалива індивідуальних системах опалення.

Для досягнення мети було виконано: Аналіз сучасної літератури, зокрема методів математичного моделювання паливоспалюючих установок. Створення розрахункової моделі котлоагрегату за його технічними параметрами. Моделювання процесу згорання біопалива з метою визначення ключових екологічних (наприклад, оксидів азоту) та енергетичних показників.

Актуальність: Біомаса визнана ключовим відновлюваним джерелом енергії, що має менший вуглецевий слід порівняно з викопним паливом, та є важливим інструментом декарбонізації. Незважаючи на різноманітність її складу, дослідження підтверджує потенціал використання біопалива як альтернативного енергоресурсу.

Практична цінність: Результати моделювання можуть слугувати основою для обґрунтованого вибору палива та для розробки подальших шляхів модернізації існуючих топкових пристроїв.

Обсяг роботи: 111 сторінок, 20 ілюстрацій, 5 таблиці, 46 бібліографічних посилань.

Ключові слова: ПОБУТОВИЙ КОТЕЛ, КАМЕРА СПАЛЮВАННЯ, БІОПАЛИВО, МОДЕЛЮВАННЯ, ПЕЛЕТИ, ОКСИДИ АЗОТУ, ЕФЕКТИВНІСТЬ.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
МСЕ – метод скінченних елементів;
ООН – Організація Об'єднаних Націй;
с/г – сільське господарство;
CFD – computational fluid dynamics;
DAF – dry-ash-free;
DPM – discrete phase model;
PDF – probability density function.
 α – коефіцієнт надлишку повітря;
 η – коефіцієнт корисної дії, %;
 A_1, B – коефіцієнти Зігерта, характерні для певного палива;
IL – loss by incomplete combustion – втрати з неповнотою згоряння, %;
Q – теплота, кДж/кг;
 q – втрата теплоти, %;
T – температура, К;
t – температура, °С.
відх – відхідні гази;
зл – зола;
с.г. – сухі димові гази;
х.п. – холодне повітря;
шл – шлак;
comb – combustion – спалювання.

ВСТУП

Головними каталізаторами глобального енергоспоживання є два фундаментальні та взаємопов'язані фактори: стрімке зростання світового населення та безперервний промисловий та економічний розвиток. Збільшення кількості людей на планеті, особливо в країнах, що розвиваються, безпосередньо призводить до підвищення попиту на енергію для опалення, транспорту, виробництва продуктів харчування та забезпечення базових побутових потреб. Водночас, економічне зростання, особливо індустріалізація та перехід до більш енергоємних способів життя (наприклад, збільшення кількості автомобілів та побутової техніки), багаторазово підсилює цей попит.

З кінця XVIII століття та початку XIX століття, які ознаменували собою Промислову революцію, енергетика набула статусу ключової суспільної потреби. Доступ до надійної та масштабної енергії став визначальним чинником для підтримки високого рівня життя, функціонування сучасних міст, інфраструктури та, безумовно, для забезпечення стійкого економічного зростання. Енергія є основою для всіх секторів економіки – від сільського господарства до високотехнологічного виробництва.

Однак, незважаючи на технологічний прогрес та зростання обізнаності щодо кліматичних змін, світова енергетична система на сьогоднішній день залишається у значній та критичній залежності від невідновлюваного викопного палива. До цієї категорії належать нафта, природний газ та вугілля. Така залежність несе в собі серйозні виклики:

1. Екологічні ризики: Спалювання викопного палива є головним джерелом викидів парникових газів, що спричиняють глобальне потепління та зміну клімату.

2. Геополітична нестабільність: Обмеженість та нерівномірне розташування запасів викопного палива часто стають причиною міжнародних конфліктів та економічної волатильності.

3. Вичерпність ресурсів: Як невідновлювані джерела, ці ресурси є кінцевими, що вимагає переходу до стабільніших та відновлюваних альтернатив.

Таким чином, сучасний світ стоїть перед нагальною необхідністю енергетичного переходу – трансформації, спрямованої на декарбонізацію та підвищення енергоефективності, щоб забезпечити потреби майбутніх поколінь без шкоди для довкілля.

Актуальність теми. На сьогоднішній день викопне паливо — зокрема, вугілля, нафта та природний газ — продовжує відігравати роль головного джерела енергії у світовому масштабі, незважаючи на очевидні екологічні виклики. Особливо критичною є ситуація в регіонах, як-от Центральна та Східна Європа, де домінування вугілля в енергетичному міксі значно ускладнює перехід до низьковуглецевої економіки.

Актуальність та невідкладність переходу до альтернативних джерел енергії (АДЕ) зумовлені подвійним стратегічним імперативом. По-перше, існує загроза виснаження ресурсів: за поточних темпів споживання, невідновлювані джерела енергії, за прогнозами, можуть бути вичерпані вже протягом 40–50 років. По-друге, це масштабна екологічна шкода, яку спричиняє їхнє використання, що має критичний негативний вплив на здоров'я населення та стабільність економіки. Основними наслідками є глобальне потепління та зміна клімату через викиди вуглекислого газу (CO_2), а також кислотні дощі, міський смог і забруднення повітря небезпечними сполуками, включаючи пил, сполуки сірки та оксиди азоту (NO_x).

З огляду на ці фактори, життєво необхідно прискорити скорочення викидів та здійснити фундаментальний перехід до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), як-от сонячна, вітрова енергія чи біомаса, оскільки вони є значно менш шкідливими для довкілля та забезпечують довгострокову стійкість

На міжнародному рівні Європейський Союз є піонером у законодавчому стимулюванні цього переходу. Перша Директива ЄС щодо відновлюваної енергії стала вирішальним поштовхом для фундаментальних, прикладних та промислових досліджень у сфері, зокрема, біопалива, розширюючи спектр його застосування. Згодом, Директива 2018/2001 (RED II) встановила конкретну та обов'язкову мету: досягти щонайменше 32% частки енергії з ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні Євросоюзу до 2030 року. Це стратегічне рішення є прямим

інструментом для скорочення викидів CO₂ та виконання зобов'язань, взятих у рамках Паризької угоди.

В контексті Паризької угоди (яка часто вживається як Протокол), світове співтовариство прагне скоротити глобальні викиди на 80% до 2050 року, щоб утримати підвищення глобальної температури в безпечних межах. На виконання цих зобов'язань, Кабінет Міністрів України затвердив та подав до Секретаріату ООН «Стратегію низьковуглецевого розвитку України до 2050 року». Ця Стратегія є ключовим національним документом, що окреслює шлях переходу української економіки на траєкторію низьковуглецевого зростання, передбачаючи зменшення викидів парникових газів, поступову відмову від викопного палива та активні інвестиції у ВДЕ.

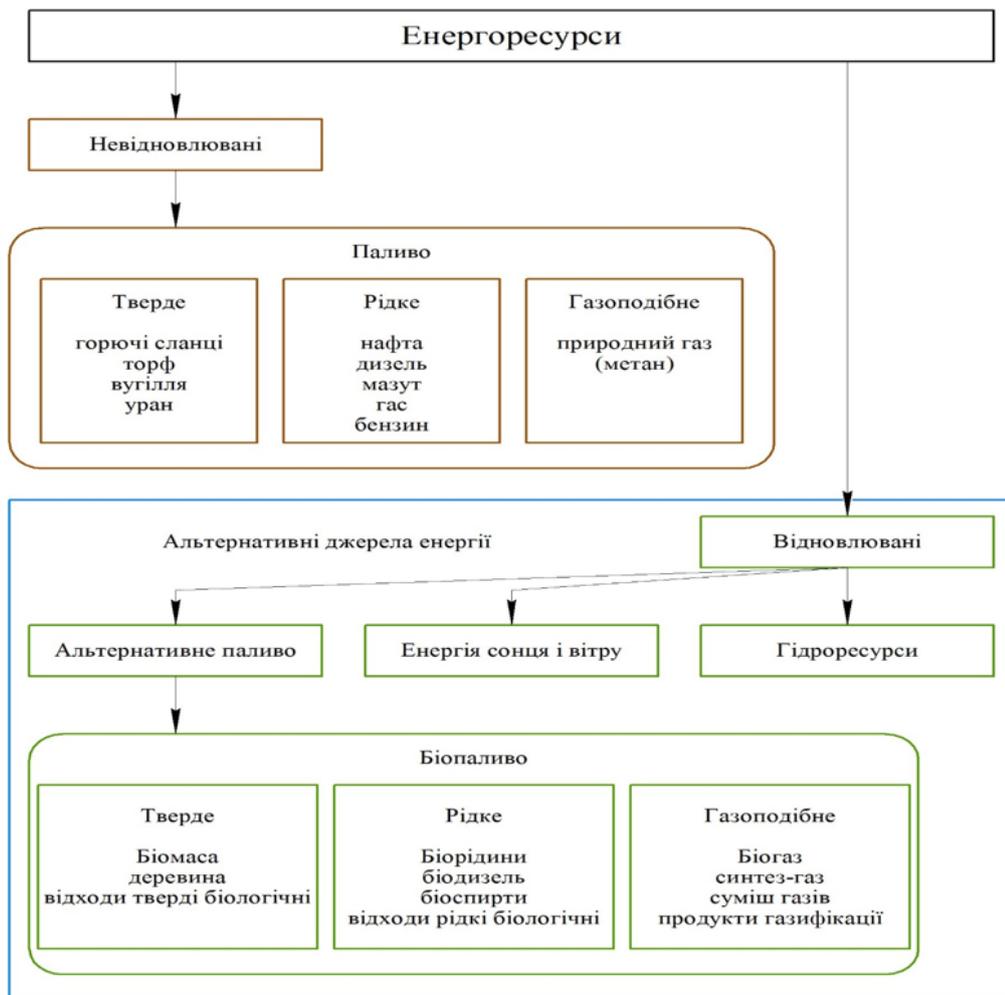


Рисунок 1 – Різновиди енергетичних ресурсів

Метою Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року, затвердженої Кабінетом Міністрів у 2016 році, є фундаментальне вдосконалення кліматичної політики країни для забезпечення її

сталого розвитку. Цей стратегічний документ прагне сформувати необхідні правові та інституційні основи для поступового та збалансованого переходу до низьковуглецевого розвитку. При цьому, ключовою умовою є неухильне дотримання принципів економічної, енергетичної та екологічної безпеки при одночасному поліпшенні добробуту громадян. Концепція охоплює комплекс взаємопов'язаних заходів, спрямованих на зміцнення інституційної бази, запобігання зміні клімату (пом'якшення), адаптацію до її неминучих наслідків та прискорення низьковуглецевого розвитку держави.

В контексті глобальної протидії потеплінню, відновлювані джерела енергії (ВДЕ) відіграють ключову роль, що чітко відображено в Енергетичній стратегії України до 2035 року [6]. Стратегія особливо виділяє біомасу та прогнозує суттєве зростання частки електроенергетики, яка використовує тверду біомасу та біогаз. Цей ріст обумовлений двома важливими факторами: відносною сталістю виробництва (за умови належного забезпечення сировиною) та загальною тенденцією до децентралізації енергетичних систем і створення локальних генеруючих потужностей, що підвищує енергетичну стійкість регіонів.

Сучасний енергетичний сектор активно зосереджується на декарбонізації промисловості — процесі, що передбачає планомірне зменшення використання викопного (вуглецевого) палива та його системне заміщення альтернативними джерелами. Необхідність цієї трансформації закріплена у згаданій Стратегії [6], яка визнає, що декарбонізація енергетики набуває вирішального значення для стримування зміни клімату, безпосередньо впливаючи на формування майбутнього балансу енергогенеруючих потужностей країни.

Новітні дослідження у сфері сталого розвитку та ефективного використання локальних ресурсів концентруються на чистих технологіях, здатних нівелювати шкоду від традиційного викопного палива. Для досягнення національних та міжнародних цілей щодо обмеження викидів парникових газів (ПГ), критично важливим є розгляд широкого спектра альтернативних видів палива. Існує значний потенціал для масового впровадження в енергетичний сектор таких специфічних енергоносіїв, як біомаса аграрного та лісового походження, тверді побутові відходи (ТПВ), осад стічних вод та звалищний газ.

Біопаливо, подібно до викопного, існує у трьох агрегатних станах (твердому, рідкому та газоподібному). Однак його ключова, стратегічна перевага полягає у значно меншому вуглецевому сліді та швидшому кругообігу вуглецю (відновлення якого відбувається у поточному біологічному циклі). Це робить його чистішою та відновлюваною альтернативою вуглеводням. Завдяки цим характеристикам, біопаливо виступає життєво важливим елементом у національних зусиллях із декарбонізації енергоємних секторів, а також інструментом для зміцнення енергонезалежності держави, знижуючи її залежність від імпортованих енергоресурсів.

Зважаючи на різноманітний хімічний склад біопалива, його використання підпадає під суворі регуляторні вимоги щодо викидів шкідливих речовин. З огляду на всі ці аспекти, основною метою є оцінка перспектив ефективного використання біопалива в Україні, особливо аграрного походження, для забезпечення енергетичних потреб муніципальної енергетики (опалення, електрогенерація) та приватних домогосподарств.

Мета та завдання дослідження ефективності пелетного біопалива

Мета даної наукової роботи полягає у розробці високоточної математичної моделі процесу горіння пелетного біопалива у типовому побутовому водогрійному котлі. Це комплексне чисельне моделювання необхідне для всебічного дослідження ключових екологічних (емісійних) та енергетичних (теплотехнічних) характеристик процесу спалювання [Моделювання Котлів]. Кінцевим результатом стане формування науково обґрунтованих, практичних рекомендацій щодо оптимального та енергоефективного використання біопалива в індивідуальних системах опалення приватних домогосподарств або муніципальних об'єктів.

Для успішної реалізації цієї амбітної мети, необхідно послідовно виконати такий комплекс дослідницьких завдань:

1. Проведення Глибокого Літературного Огляду та Аналізу Передового Досвіду. Необхідно здійснити критичний огляд сучасної науково-технічної літератури, щоб вивчити останні досягнення у сфері теплотехніки, зокрема спалювання твердого палива. Окрему увагу слід приділити методам математичного моделювання паливоспалюючих установок та результатам експериментальних

досліджень термохімічних процесів (піроліз, газифікація, догорання) при використанні біопалива.

2. Освоєння Методики CFD-Моделювання та Визначення Його Специфіки. Потрібно детально ознайомитися з методикою CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics – комп'ютерної гідродинаміки), яка є необхідною для чисельного розрахунку складних процесів тепломасообміну. Ключовим завданням є з'ясування специфіки моделювання процесу спалювання саме біопалива (зокрема, пелет) у відповідних котлоагрегатах, враховуючи гетерогенність процесу.

3. Створення Розрахункової Математичної Моделі Котла та Введення Параметрів. На основі детальних технічних (паспортних) даних реального побутового котла, необхідно створити його геометричну та математичну модель за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (наприклад, ANSYS Fluent або подібного). Далі слід ввести в розрахункову модель початкові параметри досліджуваного біопалива (склад, вологість, теплота згорання) для імітації стаціонарного режиму роботи установки.

4. Виконання Чисельного Розрахунку Процесу Згорання. Застосовуючи розроблену модель, необхідно виконати чисельний розрахунок процесу згорання біопалива в об'ємі котла. Мета цього етапу — отримання кількісних екологічних показників (концентрації CO, NO_x, CO₂) та енергетичних показників (температурні поля, ККД, теплова потужність) його функціонування.

5. Аналіз Результатів та Формулювання Практичних Рекомендацій. На завершальному етапі необхідно провести глибокий аналіз результатів моделювання з метою визначення оптимальних режимів експлуатації. На основі отриманих даних будуть надані практичні, економічно та екологічно обґрунтовані рекомендації щодо використання альтернативного палива, зокрема біопалива, виробленого з аграрної сировини (солома, лушпиння), для підвищення ефективності індивідуального теплопостачання.

Об'єктом дослідження - виступає комплексний процес чисельного моделювання спалювання твердого біопалива (зокрема, пелет або брикетів) в умовах побутового або муніципального водогрійного котла. Основна увага

приділяється створенню адекватної математичної моделі, що дозволить точно прогнозувати кількісні та якісні показники викидів шкідливих речовин (CO , NO_x , тверді частки) та парникових газів (CO_2) у атмосферу. Це моделювання є необхідним для розуміння впливу різних операційних режимів котла на його екологічну ефективність.

Предметом дослідження - є порівняльний аналіз енергетичних та екологічних характеристик декількох різновидів твердого біопалива, що належать до одного типу (наприклад, пелети з лушпиння соняшника, пелети з деревини та пелети із соломи). Аналіз базується на енергетичних показниках (зокрема, теплова потужність, термічний коефіцієнт корисної дії, температурні поля) та екологічних показниках (концентрації викидів), отриманих в результаті чисельного моделювання процесу горіння в однаковому водогрійному котлі. Таке порівняння дасть змогу виявити найбільш екологічно чистий та енергоефективний вид біопалива серед доступних аграрних або лісових сировинних ресурсів для подальшого впровадження в автономні та децентралізовані системи теплопостачання.

Методологія Дослідження та Наукова Інновація

Для всебічного виконання поставлених дослідницьких завдань було застосовано комплекс класичних та сучасних наукових методів. Основу методології склали аналіз науково-технічної інформації, порівняння різних видів біопалива та їхніх характеристик, комп'ютерне моделювання (на базі CFD-підходу) та чисельні розрахунки тепломасообміну.

Для забезпечення високої достовірності та надійності отриманих результатів, дані чисельного моделювання порівнювалися та верифікувалися з раніше опублікованими експериментальними даними інших авторитетних науковців. Обробка, систематизація та узагальнення всіх кількісних результатів здійснювалися за допомогою електронно-обчислювальної машини (ЕОМ), що забезпечило високу точність та швидкість аналізу.

Дослідження виконаної роботи полягає у таких оригінальних та важливих для галузі досягненнях:

1. Розробка Універсальної Математичної Моделі Горіння Біопалива. Створено та апробовано універсальну математичну модель, яка має здатність достовірно моделювати процес спалювання твердого біопалива різного хімічного походження (наприклад, аграрного чи лісового), за умови його однакового гранулометричного складу (стандартизовані пелети чи брикети). Ця модель ефективно працює в умовах водогрійного котла, оснащеного факельним пальником, що дозволяє швидко оцінювати поведінку нових видів біопалива без дорогих натурних експериментів.

2. Адаптація та Верифікація Методики Розрахунку Коефіцієнта Корисної Дії (ККД). В рамках роботи була адаптована, спрощена та підтверджена методика розрахунку ККД котельних агрегатів, спеціально орієнтована на побутові котли, що працюють на біопаливі. Ефективність роботи обладнання на досліджуваному паливі була комплексно перевірена за основними теплотехнічними підходами оцінки ККД (наприклад, прямим і зворотним балансовим методом). Це забезпечило узгодженість розрахункових параметрів, отриманих різними методами, включно з даними, отриманими з математичного моделювання, що підтверджує надійність моделі.

3. Запропонування Ефективного Прогностичного Підходу. Розроблено та запропоновано ефективний прогностичний підхід, який використовує отримані енергетичні та екологічні показники (ККД, викиди NO_x , CO) для комплексної та швидкої оцінки основних робочих параметрів побутових котлів. Цей підхід є цінним інструментом при спалюванні альтернативного палива з біомаси, дозволяючи оперативно прогнозувати найкращі режими роботи обладнання для мінімізації викидів та максимізації тепловіддачі.

Практична цінність та імплементаційні рекомендації дослідження

Результати виконаного дослідження мають високу практичну цінність і можуть бути безпосередньо імплементовані в енергетичну та теплотехнічну галузі України.

1. Оптимізація Використання Біопалива у Котлах Малої Потужності. На основі розробленої CFD-моделі (комп'ютерного моделювання гідро- та газодинаміки) було сформульовано конкретні та економічно доцільні рекомендації

щодо ефективного застосування альтернативного палива з біомаси у водогрійних котлах малої потужності (до 100 кВт). Ці рекомендації є особливо цінними для існуючого обладнання, де відсутні спеціальні інтенсифікатори горіння, забезпечуючи максимальний ККД навіть без значної модернізації.

2. Сприяння Декарбонізації Енергетичного Сектору. Дослідження надає важливу базову інформацію для осіб, що приймають рішення, та інженерно-технічного персоналу. Отримані енергетичні та екологічні показники спалювання біопалива у типових побутових котлах є ключовою основою для розробки та впровадження біопалива в енергетичну галузь як центрального елемента національних зусиль із декарбонізації та виконання вимог Стратегії низьковуглецевого розвитку України.

3. Обґрунтування Необхідності Турбулізації Потoku (Інтенсифікації Горіння). На основі аналізу процесів у камері згоряння обґрунтовано критичну необхідність використання інтенсифікаторів горіння. Їхнє впровадження, зокрема, через турбулізацію потоку реагуючої суміші, є вирішальним для покращення процесів теплообміну в котлі, що безпосередньо підвищує ККД. Крім того, це допомагає зменшити негативний вплив відхідних газів на навколишнє середовище за рахунок повнішого догоряння палива, поліпшуючи загальний екологічний стан.

4. Конкретні Технічні Заходи для Підвищення Ефективності та Екологічності. На основі детального аналізу змодельованих енергетичних та екологічних показників спалювання пелетного біопалива було рекомендовано два основні конструктивні та операційні заходи:

- Застосування Турбулізаторів у Теплообміннику: Рекомендовано впровадження турбулізаторів у канали димових газів, особливо у чотириходовому теплообміннику котла. Це значно збільшує коефіцієнт тепловіддачі та знижує температуру відхідних газів, підвищуючи загальну ефективність.

- Впровадження Ступеневої Подачі Повітря: Запропоновано застосування ступеневої подачі повітря як первинного та найбільш доступного заходу для зниження викидів оксидів азоту (NO_x). Це дозволяє контролювати температуру горіння та формування NO_x у високотемпературній зоні, що є критично важливим для екологічно чистого спалювання.

РОЗДІЛ 1. ІНТЕГРАЦІЯ БІОПАЛИВА ЯК СТРАТЕГІЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЕРРЕХОДУ: ВИЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАМІЩЕННЯ ВИКОПНОГО ПАЛИВА

1.1 Процес генерації теплової енергії шляхом використання різноманітних видів палива біологічного походження (біопалива)

1.1.1 Біологічне паливо (біопаливо) в твердій формі

Біомаса, яка охоплює широкий спектр органічних матеріалів, включаючи відходи деревообробної та аграрної промисловості (наприклад, солома, лушпиння, тирса), є критично важливим відновлюваним джерелом енергії (ВДЕ). Її ключова перевага полягає у здатності легко і з відносно невеликими капітальними витратами замінити традиційні викопні енергоресурси. Це особливо актуально для існуючих та нових систем прямого спалювання твердого палива (котлів і ТЕЦ), де біомаса може використовуватись як основне або допоміжне паливо.



Рисунок 1.1 – Показано кінцевий продукт пелетування біомаси.

Використання біомаси в енергетиці відбувається за двома основними напрямками:

1. **Пряме Термічне Використання:** Біомаса може використовуватися безпосередньо як сире паливо для спалювання у побутових (малої потужності) або промислових енергетичних котлах та теплоелектроцентралях. Цей метод вимагає мінімальної підготовки сировини (наприклад, сушіння та подрібнення).

2. Використання Після Обробки (Технологічне Паливо): Більш ефективним є використання біомаси після попередньої обробки та трансформації у стандартизовані види біопалива (наприклад, пелетування або брикетування). Ця грануляція значно підвищує зручність її використання (транспортування, зберігання) та, що найважливіше, забезпечує більш ефективне, контрольоване та чисте горіння завдяки стандартизованій щільності та вологості.

Завдяки своїй нейтральності до вуглецю (вуглець, що виділяється при спалюванні, раніше був поглинений рослиною з атмосфери), біомаса є важливим інструментом декарбонізації та зміцнення енергетичної незалежності на регіональному та національному рівнях.

Агропелети, що являють собою тверде паливо у формі стандартизованих гранул, вироблене з сільськогосподарських відходів (аграрних залишків), є значно ефективнішою та екологічнішою альтернативою архаїчній та шкідливій практиці спалювання цих залишків просто неба. Ця практика не лише призводить до марної втрати потенційної енергії, але й спричиняє інтенсивне забруднення довкілля димом, сажею та токсичними продуктами неповного згоряння [Екологічні Ризики]. Замість цього, аграрні відходи доцільно використовувати як цінну сировину, трансформуючи їх у енергетичні гранули для генерації корисної теплової або електричної енергії у спеціалізованих теплотехнічних установках.

Як конкретний приклад цінного біопалива аграрного походження, в дослідженні розглядається виноградна лоза

Відходи обрізки виноградників, які традиційно є проблемою утилізації, можуть слугувати стабільним та легкодоступним джерелом теплової енергії для використання у побутових опалювальних приладах або локальних котельнях.

Проведене дослідження підтвердило переваги контрольованого спалювання агропелет:

1. Підготовка та характеристика палива: На початковому етапі залишки обрізок виноградників були зібрані, пройшли необхідну механічну обробку та грануляцію (пелетування). Отримане тверде біопаливо було ретельно охарактеризоване згідно з чинними міжнародними стандартами для

твердого біопалива (EN чи ISO), що забезпечило високу якість та однорідність сировини для випробувань.

2. Випробування в Спеціалізованому Котлі: Гранульоване паливо було піддано спалюванню у спеціалізованому пелетному котлі промислового або комунального типу потужністю 150 кВт. Під час цього контрольованого тестування було проведено точне вимірювання ключових показників викидів: чадного газу (CO) — індикатора неповного згорання; оксидів азоту (NO_x) — основної причини смогу та кислотних дощів; а також загальної кількості зважених частинок (пилу) — важливого екологічного забруднювача.

3. Порівняльний аналіз впливу на довкілля: З метою порівняння та демонстрації значущості організованого спалювання, було проведено імітаційне лабораторне тестування, яке моделювало процес спалювання тих самих відходів у відкритому ґрунті (неконтрольоване горіння). Це дозволило кількісно оцінити, наскільки спеціалізований котел знижує емісію шкідливих речовин порівняно з неорганізованим спалюванням.

Ключовим висновком, отриманим у ході порівняльних випробувань, є катастрофічна різниця між неконтрольованим спалюванням агробіомаси просто неба та її використанням у спеціалізованих котлах. Зокрема, було встановлено, що викиди при спалюванні виноградної лози на відкритому повітрі значно перевищують показники, зафіксовані під час контрольованого спалювання пелет із цієї ж сировини:

- Викиди чадного газу (CO): перевищують показники котла до 120 разів, що свідчить про вкрай низьку ефективність та високу токсичність неконтрольованого горіння.
- Викиди пилу (зважених частинок): перевищують показники котла до 30 разів, що має прямий негативний вплив на якість повітря та здоров'я дихальних шляхів.

Загальний висновок однозначний: відмова від спалювання агробіомаси просто неба та її цільове використання для енергетичних потреб забезпечує істотне,

багаторазове зниження забруднення навколишнього середовища, одночасно з цим збільшуючи виробництво корисної теплової енергії з відновлюваних джерел.

Наукове дослідження [8] було присвячене розробці інноваційного інтегрованого підходу до моделювання спалювання деревних пелет у побутових опалювальних системах. Ключова складність у моделюванні твердого палива полягає у необхідності точного опису руху, тепломасообміну та хімічних перетворень кожної окремої частинки пелети під час її взаємодії з оточуючим газовим потоком.

Цю проблему було успішно вирішено шляхом комбінування двох передових чисельних методів:

1. Метод дискретних елементів (DEM): використовувався для відстеження руху та реакцій кожної окремої твердої частинки пелети на решітці пальника.

2. Обчислювальна гідродинаміка (CFD): застосовувалася для моделювання газової фази (руху повітря, продуктів згоряння та газів піролізу) у камері котла.

У розробленій моделі форму пелет, яка в реальності є циліндричною, було представлено багатогранниками, що дозволило тривимірно описати внутрішні процеси в частинці: нагрівання, сушіння, піроліз та безпосередньо спалювання. Також було враховано типову для пелетних печей порційну (періодичну) подачу палива.

Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними реальної домашньої печі потужністю 13 кВт дозволило детально вивчити нестационарне виділення водяної пари, газів піролізу та кінцевих продуктів згоряння. Важливим технічним висновком стало виявлення того, що нерівномірний розподіл пелет на решітці пальника, спричинений несиметричною системою подачі, призводить до відхилення факела горіння газу в один бік від центру камери згоряння. Це явище погіршує теплообмін та може призводити до неповного згоряння, що вказує на необхідність оптимізації конструкції пальників.

У дослідженні [9] було зосереджено увагу на вивченні, як хімічний склад різних типів деревних гранул впливає на обсяги емісії оксидів азоту (NO_x), що

утворюються під час горіння у малопотужних опалювальних котлах. Метою було встановити пряму залежність емісії NO_x від складу сировини.

Експерименти проводилися у три послідовні етапи в моделі камери згорання, оснащеної спеціалізованим пальником:

1. Визначалися викиди NO_x при спалюванні пелет, виготовлених із бука (листяна порода).
2. Аналізувалися викиди при спалюванні пелет із сосни (хвойна порода).
3. Проводилося спалювання суміші цих двох видів палива у точному співвідношенні 50:50%.

Отримані результати чітко підтверджують існування можливості зниження викидів NO_x шляхом належного підбору та змішування сировини при виробництві деревних пелет. Це дозволяє реорганізувати процес горіння (наприклад, через зміну швидкості піролізу та співвідношення між первинним і вторинним повітрям) для мінімізації утворення шкідливих оксидів азоту.

У статті [10] описано дослідження, безпосередньо спрямоване на покращення процесу спалювання як деревних, так і агропелет у водогрійних котлах. Автори розробили нову, інноваційну конструкцію системи згорання біомаси, яка є інтегрованою і включає ротаційний пальник та два типи підсилювачів горіння.

Ключова концепція цієї розробки — забезпечити її легке впровадження (retrofit) у більшість існуючих котлів, тим самим підвищуючи їхню ефективність та зменшуючи викиди відповідно до суворих вимог Стандартів ЄС.

Перед проведенням експериментального аналізу дослідники вирішили важливі методологічні проблеми, пов'язані з вимірюванням компонентів димових газів у малопотужних побутових котлах. Ці проблеми виникають через високу нестабільність таких систем та коливання фізико-хімічних властивостей пелет (особливо це стосується агропелет, що мають вищий вміст золи та хлору).

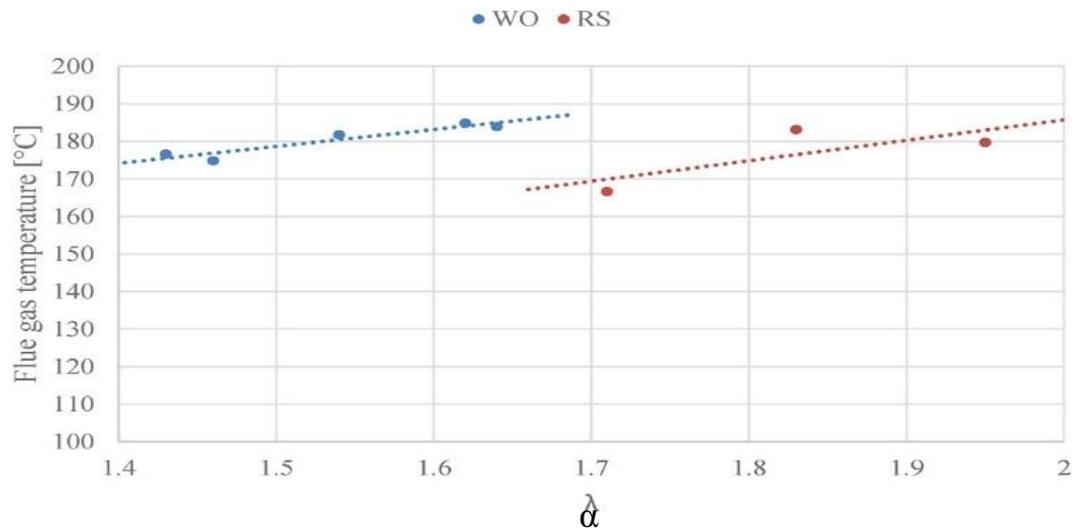
Випробування проводилися шляхом зміни налаштувань пальника для кожного виду палива, оскільки вони мають різні фізичні та хімічні характеристики. При постійній масовій витраті палива (кг/год) систематично змінювалася витрата повітря. Таким чином, дослідники вивчали вплив різних умов експлуатації для точного визначення оптимального коефіцієнта надлишку повітря (α) для

запропонованої нової конструкції . Визначення оптимального α є критично важливим для досягнення максимального ККД при мінімальних викидах CO та NO_x.

Результати проведених експериментальних вимірювань, графічно представлені на рисунках 1.2 і 1.3, демонструють критичну залежність ключових параметрів роботи котла від коефіцієнта надлишку повітря (α). При збільшенні надлишку повітря у зону горіння спостерігається одночасне зростання температури димових газів та збільшення обсягів викидів оксидів азоту (NO_x), які, згідно зі стандартами, нормовані до 10% вмісту O₂ у сухих димових газах.

Підвищення температури димових газів при зростанні α пояснюється, головним чином, збільшенням швидкості їхнього потоку через камеру згорання та теплообмінник котла. Однак, таке підвищення температури у відхідних газах вказує на зростання втрат тепла і, відповідно, на зниження термічного коефіцієнта корисної дії (ККД) установки. Справді, у межах дослідженого інтервалу α (від 1,4 до 2,0), ефективність згорання знижується зі збільшенням α , що є типовим недоліком використання надлишкового повітря понад оптимальний рівень.

Аналіз екологічних показників виявив, що вищі показники викидів NO_x були зафіксовані у випадку використання ріпакової соломи порівняно з деревиною. Ця суттєва різниця пояснюється значно вищим вмістом азоту у хімічному складі ріпакової соломи, яка є типовим агропаливом. Цей висновок підтверджує тісний та прямий зв'язок між вмістом азоту в біомасі та формуванням NO_x (зокрема, так званого "паливного NO_x) у системах її спалювання. Таким чином, склад палива є основним джерелом утворення NO_x у низькотемпературних процесах горіння біомаси, що вимагає ретельного контролю сировини для мінімізації емісії.



WO – деревні пелети, RS – пелети з соломи ріпаку

Рисунок 1.2 – Залежність температури димових газів від надлишку повітря під час згоряння пелет з деревини і соломи ріпаку [10]

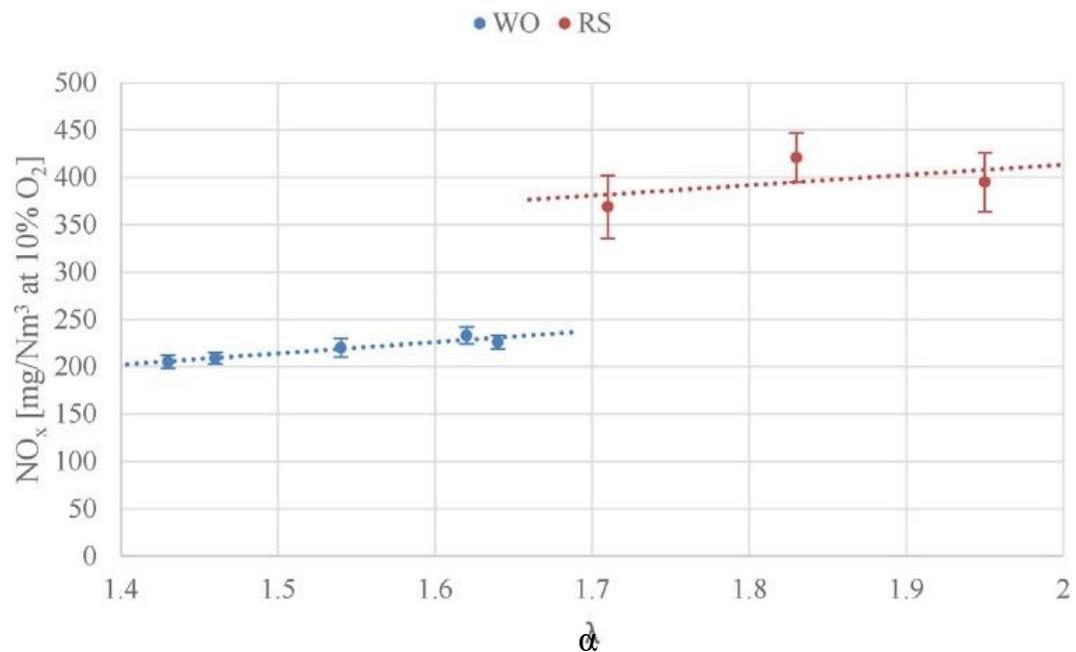


Рисунок 1.3 – Залежність викидів NO_x від надлишку повітря під час згоряння пелет з деревини і соломи ріпаку [10]

Результати експериментальних вимірювань, детально викладені у статті [10], недвозначно свідчать про те, що використання спеціалізованого інтенсифікатора горіння (ймовірно, вбудованого у конструкцію пальника) призводить до значних та системних позитивних змін у процесі спалювання біопалива. Ключовий ефект полягає у суттєвому скороченні викидів незгорілих забруднюючих речовин завдяки повнішому окисленню вуглецю: рівень оксиду вуглецю (CO), як основного

індикатора неповного згоряння, знижується на вражаючі 40% для деревних гранул та на 30% для агропелет відповідно. Також фіксується значне зменшення викидів твердих частинок (пилу), які вдалося знизити до 28–56 мг/м³ (при нормуванні до 10% O₂ у сухих димових газах), що є показником високої екологічності. Паралельно з цим, загальна ефективність згоряння (ККД) підвищується на 2,6–3,7%, що відображає пряму економічну вигоду від кращої тепловіддачі. Схожа позитивна тенденція простежується і щодо оксидів азоту (NO_x): досягається їхнє невелике, але стійке зниження. Це пояснюється тим, що оптимізоване та інтенсифіковане горіння тепер можливе при меншому коефіцієнті надлишку повітря (α), що природно призводить до менших викидів NO_x, оскільки знижується обсяг "термічного NO_x" та зменшується кількість азоту, що надходить у зону горіння. Зниження NO_x. Загалом, інтенсифікація горіння не лише покращує екологічні показники, але й робить біопаливо більш конкурентоспроможним джерелом енергії.

Дослідження, представлене у науковій роботі [11], було сфокусоване на аналізі процесу спалювання різних сортів деревної тріски, що походила як із стовбурової деревини (високоякісна сировина), так і з лісових відходів (менш однорідна сировина). Метою було вивчення впливу типу палива та режиму роботи котла на екологічні показники. Тріску спалювали у двох водогрійних котлах з різною номінальною тепловою потужністю — 50 кВт і 99 кВт. Більшість випробувань проводилася в умовах повного навантаження, але для повної характеристики системи було також виконано ряд тестів при частковому навантаженні (30% від номінальної потужності). У ході всіх експериментів систематично вимірювалися ключові показники емісії: рівні оксиду вуглецю (CO), оксидів азоту (NO_x) та загальних твердих частинок (пилу). Загалом, для більшого котла було протестовано сім різних сортів тріски, а для меншого — десять.

Ключові висновки дослідження вказують на важливі залежності:

- **Якість Сировини:** Було виявлено, що спалювання тріски зі стовбурової деревини (з меншим вмістом кори та домішок) спричиняє менші викиди CO та твердих частинок порівняно з тріскою, отриманою з лісових відходів, особливо при роботі котла на повному навантаженні.

- Режим Роботи: В цілому, експлуатація котлів на частковому навантаженні (30% потужності) призводила до значного збільшення викидів CO та твердих частинок, що є типовим явищем, спричиненим зниженням температури горіння та погіршенням умов догорання.

- Гранулометричний Склад: Додатково, було встановлено, що збільшення вмісту дрібних деревних часток у трісці також сприяє зростанню викидів CO. Це пояснюється тим, що надмірно дрібні фракції можуть швидко виноситися потоком повітря із зони горіння до того, як вони повністю прореагують, або створювати локальні зони збіднення киснем.

Ці результати підкреслюють необхідність суворого контролю якості палива (чистоти та гранулометричного складу) та оптимізації режимів роботи котлів на біомасі, особливо при роботі з нестабільним або частковим навантаженням, для забезпечення як високої ефективності, так і мінімального екологічного сліду.

У рамках ґрунтового експериментального дослідження, описаного в статті [12], вчені вивчали результати спалювання лушпиння соняшника — цінного аграрного біопалива — у конічній камері, оснащеній технологією киплячого шару. Паливо подавалося з постійною швидкістю 45 кг/год. Ключовим завданням було проаналізувати, як операційні параметри впливають на продуктивність горіння та характеристики викидів.

Основними змінними параметрами були:

- Коефіцієнт надлишку повітря (α): варіювався у широкому діапазоні від 20% до 80%.
- Співвідношення вторинного повітря до загального повітря (S/T): варіювалося від 0 до 0,4 (від 0% до 40% загальної кількості).

При цьому вторинне повітря подавалося тангенціально (по дотичній) до камери згорання на відстані 0,5 м над системою подачі палива. Такий спосіб подачі вторинного повітря сприяє турбулізації та кращому змішуванню газів, що є важливим для повного догорання.

У ході роботи вимірювалися температура та концентрація газів як уздовж камери (по висоті), так і на її виході. Аналізувалися викиди оксиду вуглецю (CO),

оксиду азоту (NO), вуглеводнів (C_xH_y), а також оцінювалася загальна ефективність згоряння.

Було встановлено, що високі швидкості горіння та інтенсивна хімічна реакція спостерігаються у двох різних зонах всередині конічної камери:

1. В області дна камери (киплячий шар): де переважає первинне повітря, яке забезпечує газифікацію та інтенсивне горіння твердих частинок.
2. У надшаровому просторі: де відбувається догоряння летких продуктів піролізу завдяки подачі вторинного повітря, що має вирішальне значення для зниження викидів CO та C_xH_y .

Це підтверджує, що оптимізація розподілу повітря між первинною та вторинною зонами має вирішальне значення для досягнення високої екологічної та енергетичної продуктивності установок з киплячим шаром, особливо при роботі з таким легким і високореакційним паливом, як лушпиння соняшника.

Експериментальні дані, які детально ілюструють профілі осьової температури та концентрації кисню (O_2) у конічній камері згоряння з технологією киплячого шару під час спалювання лушпиння соняшника, представлені на рисунку 1.4. Це дослідження [12] проводилося при фіксованому надлишку повітря (α) на рівні приблизно 40%, тоді як співвідношення вторинного повітря до загального (S/T) варіювалося в діапазоні від 0,1 до 0,4 (від 10% до 40% загального повітря).

Аналіз цих профілів виявив, що подача вторинного повітря мала відносно незначний вплив на загальну температуру в камері згоряння, що свідчить про ефективний розподіл теплової енергії в системі киплячого шару. Проте було встановлено критично важливий температурний градієнт: при нагнітанні вторинного повітря температура в зоні шару на дні камери була відносно низькою порівняно з температурою в надшаровому просторі.

Цей феномен пояснюється тим, що первинне повітря на дні, що підтримує кипіння та газифікацію, сприяє інтенсивному виходу летких речовин, але сама зона шару може бути охолоджена значною кількістю поданого первинного повітря. Натомість, надшаровий простір виступає як зона догоряння, де вторинне повітря вступає в реакцію з виділеними газами піролізу, що призводить до інтенсивного,

високотемпературного окислення і, як наслідок, до пікових температур. Зниження температури в нижній зоні є бажаним, оскільки це мінімізує шлакування та спікання (особливо актуально для лущиння соняшника з високим вмістом мінералів), тоді як висока температура в надшаровому просторі забезпечує повне згоряння CO та вуглеводнів.

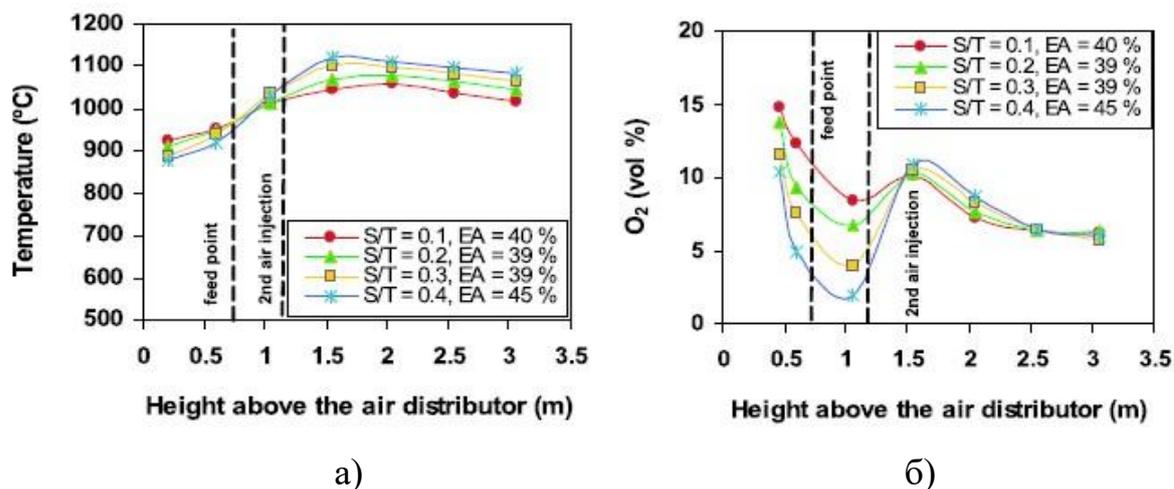


Рисунок 1.4 – Вплив співвідношення S/T на профілі осьової температури (а) і концентрації O₂ (б) вздовж камери згоряння з киплячим шаром під час згоряння соняшникової шкаралупи з витратою 45 кг/год [12]

Вплив вторинного повітря на розподіл осьової температури в камері згоряння виявився неоднаковим для різних її зон, що є характерною ознакою поетапного (ступеневого) спалювання. При зростанні співвідношення вторинного повітря до загального (S/T), відбувалося зниження температури в області паливного шару (на дні камери). Цей ефект пояснюється меншим вмістом кисню (O₂) у цій нижній зоні, оскільки значна частина повітря відводиться вгору. Як наслідок, у шарі спостерігається нижча швидкість реакції гетерогенного згоряння. Натомість, температура в надшаровому просторі зростала за рахунок інтенсивного згоряння летючих речовин (після піролізу), яке відбувалося у зоні завихрення та висхідному потоці з додаванням вторинного повітря.

Згідно зі стандартом викидів Таїланду, на який посилаються автори [12], оптимальні робочі умови для забезпечення контролю викидів CO та NO при досягненні досить високої ефективності згоряння (близько 99%) були встановлені

при надлишку повітря $\alpha = 40-60\%$ і співвідношенні $S/T = 0,3$. Порівняно зі звичайним (одноступеневим) режимом спалювання, поетапне спалювання з поступовою подачею повітря забезпечило суттєве зменшення викидів NO на 27% при роботі камери з $\alpha = 40\%$ та $S/T = 0,3$. Однак, незважаючи на успіх у зниженні NO, при цьому режимі викиди CO та вуглеводнів (C_xH_y) залишалися доволі високими. Це вказує на необхідність балансу між зниженням температури для контролю NO і забезпеченням достатньої температури та часу перебування для повного догорання CO.

Сільськогосподарська залишкова біомаса (така як лушпиння, солома) має великий світовий потенціал для виробництва енергії, проте її використання часто залишається обмеженим через суттєві відмінності у хімічному та мінеральному складі від інших видів біомаси, наприклад, лісового походження. Одна з ключових відмінностей пов'язана саме з характеристиками золи, які загострюють певні експлуатаційні проблеми в процесі спалювання. До цих проблемних явищ належать, зокрема, спікання золи (утворення твердих, важковидальємих конгломератів) та осадження летючої золи на поверхнях теплообмінника, що призводить до зниження ККД та необхідності частих зупинок для чищення.

Дослідження, описане у роботі [13], зосереджувалося на експериментальному аналізі чотирьох різних агропелет, виготовлених із сільськогосподарських залишків, включаючи обрізки виноградників та суміші трав'янистих компонентів (як-от кукурудзяна або ячмінна солома). Ці зразки порівнювалися з гранулами лісової деревини, які слугували еталонним паливом. Паливо систематично оцінювалося у лабораторному реакторі з нерухомим шаром за різних робочих умов. Ключовим завданням було проаналізувати вплив потоку повітря на вході та температури на ступінь спікання золи та коефіцієнт осадження летючої золи, що є критичними проблемами при спалюванні агробіомаси.

Для всіх п'яти випробуваних видів біопалива автори [13] встановили чітке обернено пропорційне співвідношення між коефіцієнтом надлишку повітря (α) та коефіцієнтом осадження графік залежності α та осадження. Це свідчить про те, що збільшення обсягу повітря може або зменшувати час перебування летючих компонентів у високотемпературній зоні, або змінювати хімічний склад

осаджуваної золи. Загальні результати підтвердили, що осадження золи було більш вираженим для всіх чотирьох агропелет порівняно з деревиною, що пояснюється їхнім вищим вмістом лужних металів (калію). Крім того, ступінь спікання виявився найбільш суттєвим для трьох агропелет із трав'янистими компонентами, які зазвичай містять більше кремнію та калію. Отримана інформація є надзвичайно корисною для проектування та експлуатації систем термохімічного перетворення, оскільки дозволяє адаптувати конструкцію котлів і режими роботи спеціально для сільськогосподарської залишкової біомаси, сприяючи її подальшому виходу на енергетичний ринок.

З огляду на економічну вигоду та широку доступність сировини, у побутових печах і промислових котлах часто застосовують змішане (спільне) спалювання (ко-комбустію) різних типів біомаси, а також вугілля чи пластику [14]. Хоча доведено, що спільне спалювання може значно підвищити ефективність горіння та сприяти зменшенню викидів вуглецю, дане конкретне дослідження [14] було сфокусоване виключно на спільному спалюванні відходів сільського та лісового господарства.

У рамках роботи було проведено кінетичний та термодинамічний аналізи п'яти різних типів пелет, виготовлених із суміші деревної тирси та шкаралупи арахісу у різних пропорціях, використовуючи термогравіметричний аналізатор (ТГА). Також були здійснені експерименти зі згорянням цих п'яти видів пелет у печі з примусовою тягою. За результатами цих випробувань обговорювалися показники викидів оксидів азоту (NO_x) та монооксиду вуглецю (CO). Дослідження продемонструвало, що ефективність згоряння змішаного палива покращується порівняно з чистою деревною тирсою, що підтверджується зростанням індексів займистості, вигорання та повного згоряння. Було встановлено, що механізм горіння, енергія активації та інші термодинамічні параметри суттєво змінюються залежно від застосованого співвідношення змішування.

Ключові емісійні висновки показали, що усі три випробувані змішані види палива призвели до значного скорочення викидів CO , що є позитивним ефектом завдяки кращій реактивності суміші. Однак, водночас вони спричинили збільшення викидів NO_x , що, ймовірно, пов'язано з вищим вмістом азоту в шкаралупі арахісу порівняно з деревною тирсою. Це дослідження успішно визначило комплекс

динамічних, термодинамічних, емісійних та інших параметрів спільного спалювання деревної тирси та шкаралупи арахісу.

У промисловому секторі та великій енергетиці біомаса, як універсальне відновлюване джерело енергії, має кілька ключових та стратегічних шляхів застосування. Ці підходи дозволяють максимально ефективно інтегрувати органічні відходи у виробничі та енергогенеруючі процеси:

1. Пряме Спалювання (Термічна Конверсія): Біомаса може застосовуватися безпосередньо як сировина для спалювання у спеціалізованих енергетичних котлах на ТЕЦ або промислових котельнях. Це найпростіший і найбільш поширений метод, який передбачає перетворення хімічної енергії палива в теплову для виробництва пари, гарячої води або електроенергії.

2. Спільне Спалювання (Ко-спалювання): Одним із найбільш економічно доцільних та швидких методів декарбонізації є спільне спалювання (ко-комбустія) біомаси разом із викопним вугіллям у вже існуючих вугільних електростанціях. Ця технологія дозволяє істотно знизити викиди CO₂ та зменшити залежність від вугілля без необхідності значної модернізації основного обладнання.

3. Перетворення на Рідке або Газоподібне Біопаливо (Біоконверсія): Біомасу також можна перетворювати на вторинні, більш зручні та енергоємні форми палива. Сюди належать:

- Рідке біопаливо (наприклад, біодизель та біоетанол), які використовуються переважно у транспортному секторі.
- Газоподібне біопаливо (наприклад, біогаз або синтез-газ), які можуть використовуватися в газових турбінах або двигунах внутрішнього згорання для високоякісної генерації електроенергії та тепла.

Таким чином, промислове використання біомаси охоплює як прямі, так і технологічно складніші методи, що дозволяють ефективно замінити традиційне викопне паливо та сприяти виконанню національних екологічних стратегій.

1.1.2 Біологічне паливо (біопаливо) в рідкій формі

Біодизель і біорідини становлять клас рідких видів палива, що виробляються з біомаси та призначені для задоволення різноманітних енергетичних потреб, охоплюючи надзвичайно широкий спектр як біосировини, так і проміжних енергоносіїв. Світова наукова спільнота, особливо іноземні дослідники, активно вивчає та розвиває численні варіанти цього рідкого біопалива.

Вчені сфокусовані на таких різноманітних джерелах та продуктах конверсії:

- **Продукти Термохімічної Конверсії:** Досліджуються біомасла швидкого піролізу, які отримують шляхом швидкого термічного розкладу біомаси, а також біосировина, отримана гідротермальним зрідженням, та зріджена деревина [15].
- **Олії та Спирти:** Дослідження охоплюють прості рослинні олії та різні види біоспиртів (наприклад, біоетанол) [15].
- **Спеціалізований Біодизель:** Значна увага приділяється біодизелю, виробленому з відпрацьованої кулінарної олії [16], що є важливим підходом до утилізації відходів. Також вивчаються характеристики біодизельного палива з кокосової олії [18], пальмової олії, а також метилові ефіри рапсової олії [19], які є традиційними джерелами.
- **Інноваційні Джерела:** Досліджується навіть рідке паливо, отримане шляхом термічної конверсії поліетиленового воску [17], що поєднує проблеми утилізації пластику з виробництвом енергії.

Така розмаїтість джерел і методів підтверджує глобальний інтерес до рідкого біопалива як ефективною та відновлюваною альтернативи нафтопродуктам, особливо для секторів, де потрібна висока щільність енергії, як-от транспорт.

Дослідження [15] являє собою систематичний та всебічний огляд використання біорідин у сфері енергетики, охоплюючи критично важливі аспекти від виробництва до кінцевого використання. Робота зосереджується на кількох ключових проблемах та викликах, що гальмують широке впровадження цього палива:

1. **Проблеми, пов'язані з властивостями самого палива:** йдеться про такі параметри, як в'язкість, кислотність, вміст води та нестабільність, які можуть впливати на процес горіння.

2. Необхідність адаптації двигунів та питання довговічності обладнання: аналізуються вимоги до модифікації існуючих систем та запобігання корозії або зносу, спричиненим агресивними властивостями деяких біорідин.

3. Аналіз продуктивності й викидів: оцінюються енергетична ефективність двигунів при роботі на біорідинах та їхній екологічний слід.

Методологічно робота побудована таким чином, щоб охопити весь життєвий цикл палива. Вона починається з глибокого аналізу технологій переробки сировини і палива, які мають вирішальний вплив на кінцеві фізико-хімічні властивості біопалива (наприклад, методи піролізу, гідротермального зрідження, етерифікації).

Крім того, дослідники приділяють особливу увагу шляхам утилізації потоків відходів, що є логічним наслідком постійного зростання циклічного використання матеріалів і ресурсів (циркулярна економіка). На завершення, у роботі представлені інноваційні пропозиції та майбутні можливості для подальших технічних удосконалень у всьому циклі виробництва і споживання біорідин, слугуючи стратегічним орієнтиром для майбутніх науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт (НДДКР) у цій швидкозростаючій та критично важливій для декарбонізації галузі.

Дослідження, представлене у роботі [16], мало на меті порівняльний аналіз впливу на навколишнє середовище при виробництві та застосуванні біодизельної суміші B25, яка була виготовлена з відходів кулінарної олії (тобто вторинної сировини), порівняно зі стандартним дизельним паливом із наднизьким вмістом сірки (ULSD). Цей аналіз виконувався за допомогою методології оцінки життєвого циклу (LCA), що дозволяє оцінити всі вторинні впливи палива «від колиски до могили», ґрунтуючись на первинних даних, отриманих під час роботи генератора потужністю 33 кВт при 100% номінального навантаження.

Моделювання LCA показало, що суміш B25 є екологічно кращою за ULSD у всіх оцінених категоріях впливу. Зокрема, було виявлено значне зменшення негативного впливу у таких критичних категоріях:

- Потенціал токсичності для людини: зниження на 39,44%.
- Потенціал підкислення (кислотні дощі): зниження на 38,73%.
- Потенціал глобального потепління (GWP): зниження на 35,77%.

Ці дані підтверджують, що використання біодизеля на основі відходів забезпечує значні переваги на макрорівні. Однак, експериментальні вимірювання викидів вихлопних газів під час роботи генератора виявили типовий для біодизеля компроміс: при використанні B25, порівняно з ULSD, спостерігається збільшення викидів CO на 52% (що є наслідком меншої леткості та гіршого змішування) та зниження викидів NO_x на 41,5%. Це зниження NO_x пояснюється наявністю кисню у молекулі біодизеля та його іншими властивостями горіння, тоді як зростання CO вимагає подальшої оптимізації конструкції двигунів або каталітичних нейтралізаторів.

У дослідженні [17] було вивчено інноваційну можливість використання поліетиленового воску (продукту переробки пластикових відходів) як рідкого палива. Ця трансформація здійснювалася шляхом некаталітичного піролізу, який проводився за трьох ключових температурних режимів: 400, 450 і 500 °C. Результати аналізу показали, що найвищий вихід рідкого продукту — 78,24% — досягається при температурі піролізу 450 °C. Залишкові продукти цього процесу склалися з неконденсованого газу та твердого вуглецевого залишку.

Аналіз елементного складу підтвердив, що піролізні продукти мають схожі хімічні компоненти незалежно від конкретних умов експерименту. Найважливіше, питома вага, в'язкість та теплотворна здатність отриманого піролізного масла (так званого "біонафти") відповідають звичайним стандартам дизельного палива. Це відкриває шлях до використання пластикових відходів для виробництва якісних енергоносіїв.

Один із ключових шляхів зменшення залежності від викопного палива та підвищення екологічності — це додавання рідкого біопалива до традиційного дизеля або його використання у чистому вигляді. У статті [18] було проведено дослідження метилового ефіру кокосового горіха (кокосового біодизеля), стандартного дизельного палива та їхньої 25% об'ємної суміші.

Для полегшення спалювання великих об'ємів і досягнення амбітних цілей із наднизьких викидів була розроблена нова, вискоелективна турбулентна камера згоряння з вихровим пальником потужністю 13,3 кВт. В експериментах дослідники

регулювали два важливі параметри: температуру попереднього підігріву повітря для горіння (від 150 до 350°C) та тиск повітря для розпилення (від 0,3 до 0,9 бар).

Завдяки вдосконаленій конструкції та закритій атмосферній камері згорання вдалося досягти надзвичайно низького рівня викидів CO — нижче 10 ppm (частин на мільйон) у більшості випробувань. Крім того, було зафіксовано істотне зниження емісії NO на 90% порівняно з пальником попереднього змішування за аналогічних робочих умов результати NO та CO. Ці результати демонструють, що за допомогою інженерних рішень та оптимізації процесу згорання, біодизель може забезпечувати не лише відновлювану енергію, але й надзвичайно високі екологічні стандарти.

У цьому комплексному дослідженні [19] було проведено широкий порівняльний аналіз, необхідність якого зумовлена значними відмінностями у хімічних та фізичних характеристиках відновлюваних видів палива по всьому світу. Експерименти охопили шість різних паливних зразків:

1. Три відновлювані вуглеводневі види палива (біорідини): кокосова олія, пальмова олія та метилові ефіри (отримані з кулінарної і рапсової олії).

2. Три звичайні (викопні) види палива: стандартне реактивне паливо JP-8, стандартне дизельне паливо та природний газ.

Кінцева мета дослідження полягала у порівнянні таких параметрів, як структура полум'я, хемілюмінесценція (світіння, спричинене хімічними реакціями) та викиди забруднюючих речовин для всіх цих палив. Усі випробування проводилися з використанням інноваційної технології «розподіленого» горіння (Distributed Combustion), яка була запропонована на основі концепції вихрового пальника з попередньої роботи [18].

Результати порівняння, проведеного в умовах розподіленого горіння, показали, що реактивне паливо (JP-8), стандартне дизельне паливо та кокосовий біодизель мають найвищий потенціал для успішного розподіленого спалювання. Це свідчить про те, що кокосовий біодизель може ефективно заміщати викопне паливо навіть у таких складних технологіях, як Distributed Combustion.

Однак, було зроблено критичне застереження: неправильне налаштування пальника та/або некоректна подача палива/повітря може призвести до неприпустимо високих викидів забруднюючих речовин, що підкреслює необхідність точної інженерної оптимізації для забезпечення екологічно чистого горіння біопалива.

1.2 Питання та обмеження, що виникають при застосуванні газоподібного палива

Природний газ, головним компонентом якого є метан (CH_4), історично залишається привабливим джерелом енергії завдяки своїй великій доступності та високій теплоті згоряння на одиницю виробленого вуглекислого газу (CO_2), що робить його відносно чистішим серед викопного палива. Незважаючи на це, викиди, що утворюються під час його факельного спалювання, передусім оксиди азоту (NO_x), становлять шкідливий вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини, оскільки NO_x формується за високих температур екологічні ризики NO_x .

Для досягнення раціонального та чистого використання природного газу в промислових та енергетичних установках пропонується застосовувати інноваційний метод — каталітичне спалювання [20]. Науковці стверджують, що використання каталізаторів дозволяє здійснити повне окислення метану за значно нижчих температур (зазвичай близько 500°C). Таке зниження температури у зоні реакції значною мірою запобігає утворенню забруднюючих речовин (особливо термічного NO_x), які виникають лише за високих температур (понад 1300°C).

Стаття [20] являє собою ґрунтовний огляд літератури з каталітичного спалювання метану, де обговорюються різноманітні аспекти, включаючи типи каталізаторів (наприклад, паладієві або платинові), механізми реакцій, кінетичні характеристики, вплив різних експлуатаційних факторів та різні типи реакторів. На думку авторів, ця робота є важливою довідковою інформацією, яка допоможе в розробці ефективно спроектованих реакторів, оснащених відповідними каталізаторами і налаштованих на належні робочі умови, що в кінцевому підсумку сприятиме реалізації сприятливих кінетичних характеристик для їхнього подальшого впровадження та поширення у різних галузях промисловості.

Через постійне зростання світового попиту на енергію та інтенсивне використання викопних джерел, безперервно розвиваються відновлювані й альтернативні джерела енергії. Хоча серед викопних ресурсів природний газ продемонстрував найбільший приріст у споживанні за останнє десятиліття, його інтенсивне використання все ж несе ризик вичерпання (як невідновлюваний ресурс), що стимулює прискорений перехід до альтернативних джерел. У цьому контексті біомаса є особливо перспективною заміною викопним ресурсам, оскільки вона сприяє енергетичній безпеці (через локальну доступність сировини) та має значні екологічні переваги (вуглецева нейтральність).

1.3 Газоподібне паливо з альтернативних джерел

Пряме спалювання біомаси в енергетичних котлах, незважаючи на його доступність, породжує низку серйозних технічних та економічних проблем. Серед них: інтенсивна корозія поверхонь теплообміну, відкладення золи (фоулінг) на цих поверхнях, що знижує ефективність, та висока енергозатратність підготовки палива (наприклад, сушіння та подрібнення).

Одним із найбільш перспективних способів уникнути цих труднощів є перехід до непрямого спільного спалювання або використання біомаси у формі вторинних енергоносіїв. Це передбачає, що попередньо оброблена біомаса використовується у формі рідкого біопалива або синтез-газу (Synthetic Gas – Syngas).

Газифікація — це термохімічний процес, у якому вуглецеві складові твердого палива трансформуються у горючий газ, відомий як синтез-газ. Ця технологія вважається дуже перспективною для енергетичних цілей, особливо в регіонах, де є великі та легкодоступні запаси біомаси (наприклад, аграрні чи лісові відходи). Оскільки енергія, отримана з компонентів відходів, що розкладаються, класифікується як відновлювана, для газифікації можуть використовуватися як тверді, так і рідкі відходи. Передбачається, що в країнах, де вугілля має значну частку в енергетичному балансі, зростатиме використання палива, отриманого з відходів, а також збільшуватимуться обсяги енергії, що виробляються на підприємствах, призначених для спалювання твердих побутових відходів (ТПВ).

Синтетичний газ (синтез-газ) може бути вироблений двома основними, але абсолютно різними шляхами:

1. Термохімічний Шлях: Шляхом газифікації різних видів палива (вугілля, біомаса) з наступним можливим процесом метанування (для підвищення частки CH_4).

2. Біологічний Шлях: Через ферментацію вуглеводів бактеріями в анаеробних умовах, відому як анаеробне перетравлення біомаси (наприклад, гною, деревини, соломи та зернових), що призводить до утворення біогазу, який є різновидом синтез-газу.

Синтез-газ містить легкозаймисті компоненти, головним чином водень (H_2), монооксид вуглецю (CO) та метан (CH_4), які забезпечують його теплотворну здатність. Крім того, він містить інертні гази, такі як азот і вуглекислий газ, певну частку ненасичених вуглеводнів (C_2H_2 , C_6H_6) та різноманітні забруднювачі, серед яких сірководень (H_2S), аміак (NH_3), смоли, галогени та пил.

Склад синтез-газу та вміст у ньому забруднень залежить від кількох ключових факторів:

- Тип газифікатора: (наприклад, киплячий шар, нерухомий шар)
- Робочі умови процесу: (температура, тиск, час перебування палива)
- Склад палива: (вміст вологи, летких речовин, золи).

Усі ці параметри та умови безпосередньо впливають на теплотворну здатність кінцевого синтез-газу, визначаючи його придатність для використання в газових турбінах чи двигунах внутрішнього згорання.

1.3.1 Дослідницька робота, присвячена спалюванню синтетичного паливного газу (синтез-газу)

Науковці приділяють значну увагу характеристикам горіння факелів синтез-газу (Syngas), що стало предметом численних експериментальних та чисельних досліджень. Цей інтерес обумовлений не лише енергетичною цінністю синтез-газу, а й його потенціалом у контексті контролю викидів шкідливих оксидів.

У своїй роботі [21] дослідник Вілк (Wilk) представив чисельні розрахунки, сфокусовані на процесі зниження оксидів азоту (NO_x). Як вторинне паливо

використовувався синтез-газ, отриманий шляхом газифікації осаду стічних вод, що спалювався у реакторі, який працює на природному газі (основне паливо). Основною метою дослідження було не лише прогнозування забруднюючих речовин на виході, але й визначення впливу додавання синтез-газу на загальний процес спалювання природного газу. Також було ретельно вивчено вплив такого операційного параметра, як час перебування паливно-повітряної суміші у зоні реакції.

Проведені чисельні випробування (CFD-моделювання) підтверджують, що спільне спалювання природного газу із синтез-газом у спеціалізованому процесі, відомому як повторне спалювання (re-burning), є високоефективним методом. Цей метод дозволяє досягти суттєвого зменшення викидів NO_x — до 50%. Таким чином, синтез-газ, вироблений із відносно складного та проблематичного для утилізації осаду стічних вод, може бути успішно застосований як вторинне паливо для повторного спалювання, що вирішує подвійну проблему — утилізації відходів та контролю шкідливих викидів в енергетиці.

Дослідження, представлене у статті [22], присвячене вивченню горіння синтез-газу з нетипово високою концентрацією вуглеводнів (C_xH_y) та сполук азоту (N_i). Для забезпечення чистого та ефективного спалювання такого складного палива була використана інноваційна технологія зонального об'ємного спалювання (ZVC) (Zonal Volumetric Combustion). У ході експериментів вивчалася ефективність ZVC для синтез-газів, які містили такі типові забруднювачі, як бензол (як представник вуглеводнів), піридин та аміак (як представники азотистих сполук).

Було встановлено, що вплив високого вмісту вуглеводнів (C_xH_y) та різних типів сполук азоту (N_i) у паливі на загальні викиди NO_x , CO та C_xH_y є незначним для синтез-газу з низькою початковою концентрацією N_i . Це підтверджує, що технологія ZVC ефективно нівелює негативний вплив складних вуглеводнів. У самій технології ZVC ключовим регулюючим фактором є кількість повітря (або кисню) в зоні відновлення, яка має домінуючий вплив на викиди NO_x .

Найвищий викид NO_x був зафіксований для палива, що містило піридин і бензол, у випадку, коли рівень кисню в зоні відновлення був найвищим серед досліджених. Це підкреслює, що надмірна кількість кисню в цій зоні, призначеній

для відновлення NO_x , може, навпаки, стимулювати його утворення. Натомість, найнижчий коефіцієнт перетворення N_i у NO_x був отриманий для висококалорійного синтез-газу. Це вказує на потенціал висококалорійного палива для більш чистого спалювання. Важливою екологічною перевагою є те, що навіть при високому вмісті C_xH_y у паливі, у димових газах сажі та CO не спостерігалось, що свідчить про надзвичайно повне та чисте згоряння усіх вуглеводнів, досягнуте завдяки ZVC.

У роботі [23] дослідник Верле (Werle) представив чисельні результати щодо зниження викидів оксидів азоту (NO_x) під час спільного спалювання синтез-газу з низькою калорійністю у типовому вугільному котлі. Синтез-газ було отримано з осаду стічних вод, що робить його екологічно вигідним вторинним паливом. Було чітко встановлено, що спільне спалювання кам'яного вугілля з цим синтез-газом зменшує загальні викиди NO . Найвищий показник ефективності відновлення NO_x — понад 90% — був досягнутий при молярному коефіцієнті потоку синтез-газу, що дорівнює 15%. Розрахунки свідчать, що використання цього аналізованого синтез-газу як вторинного палива може дати кращі результати щодо зниження NO_x , ніж складніший і дорожчий процес розширеного допалювання (пов'язаний із закачуванням аміаку або сечовини).

У дослідженні [24] Донг (Dong) провів чисельне дослідження характеристик емісії NO для полум'я синтез-газу, збагаченого CO та H_2 , вивчаючи його в двох ключових режимах: дифузії (коли паливо і повітря змішуються під час горіння) та попереднього змішування (коли вони змішуються до подачі в зону горіння). Також він проаналізував, як розбавлення H_2O , CO_2 та N_2 впливає на утворення NO у протитечійному полум'ї.

Ключові висновки щодо механізмів емісії NO_x :

- Дифузійний Факел: Основним механізмом емісії NO_x є тепловий шлях (Thermal NO_x), особливо для синтез-газу, збагаченого H_2 , оскільки висока реакційна здатність водню забезпечує найвищу температуру полум'я.
- Кінетичне Горіння (Попереднє Змішування): Додавання CO_2 призводить до вищої концентрації NO , ніж додавання H_2O при аналогічному

розбавленні. Це відбувається тому, що CO_2 сприяє утворенню більшої кількості O-радикалів через дисоціацію, а O-радикали є прекурсорами NO.

Ефект N_2 (Азот): За умов, описаних у статті [24], додавання N_2 має двоїстий вплив: воно одночасно збільшує джерело утворення NO (через утворення N-радикалів, які є частиною паливного NO_x) і знижує температуру полум'я (через ефект розбавлення). У кінцевому підсумку, це призводить до загального зменшення утворення NO, демонструючи складний баланс між термічними та кінетичними шляхами формування NO_x .

У дослідженні [25] Мехреган (Mehregan) провів детальний аналіз впливу кількох факторів на викиди NO_x у процесі безполум'яного згоряння біогазу в конфігурації дифузійного спалювання. Використовувався типовий біогаз зі складом 60% CH_4 і 40% CO_2 , причому окисник одночасно розбавлявся N_2 або CO_2 (тип баласту), а також попередньо нагрівався. Досліджуваними параметрами були: тип розбавляючої речовини, концентрація кисню (5%, 7% і 10%) та температура попереднього підігріву окисника (900 K, 1100 K і 1300 K).

Було встановлено, що збільшення емісії NO_x виявилось більш чутливим до концентрації кисню, ніж до температури попереднього підігріву повітря. При цьому тип домішок (баласту) лише незначно впливає на викиди NO_x , хоча сама емісія зменшується внаслідок розведення N_2 , а не CO_2 . Згідно з дисперсним аналізом, найефективнішими проектними факторами (тобто тими, що мають найбільший вплив) на викиди NO_x є концентрація кисню та температура попередньо нагрітого повітря.

Очевидно, що на викиди оксидів азоту (NO_x) безпосередньо впливають як умови експлуатації обладнання, так і конфігурація факела горіння. Чжан (Zhang) у роботі [26] використав протитечійну конфігурацію пальника для чисельного дослідження впливу розведення компонентами азоту (N_2) та вуглекислого газу (CO_2) на ключові властивості факелів попередньо змішаного синтез-газу, насиченого CO.

Було встановлено, що розведення CO_2 має відносно сильніший вплив на поширення полум'я та його згасання, ніж розведення N_2 . Чисельне моделювання проводилося в одновимірній конфігурації протитечійного пальника з детальним

урахуванням хімії горіння. Дослідники кількісно оцінили важливість трьох взаємопов'язаних ефектів: теплового ефекту, хімічного ефекту та ефекту зміни дифузії.

Ключові висновки щодо ефектів розведення:

- Тепловий ефект домінує у зниженні швидкості ламінарного полум'я та схильності до згасання.
- Хімічний ефект, спричинений розведенням CO_2 (за рахунок генерації O-радикалів, як було зазначено раніше), є дещо сильнішим для зниження межі згасання, ніж для швидкості ламінарного полум'я.
- При цьому ефект зміни дифузії виявився незначним як при розведенні CO_2 , так і при розведенні N_2 .

Це підтверджує складну природу горіння, де теплові втрати, спричинені розведенням, відіграють основну роль у зниженні швидкості полум'я.

Дослідник Саміран (Samiran) у роботі [27] провів експериментальне дослідження характеристик стабілізації факела кінетичного вихрового полум'я синтез-газу, насиченого CO, в умовах, типових для бідного згорання в камерах газових турбін. Синтез-газ, збагачений CO, повністю змішувався з повітрям та розріджувачами (CH_4 і CO_2) перед запалюванням. Зображення полум'я показали, що синтез-газ з помірним вмістом CO утворює менш яскраве та більш компактне полум'я порівняно з газом з високим вмістом CO, що свідчить про нижчу схильність до утворення сажі. Важливо, що синтетичні гази з високим вмістом CO продемонстрували помітно менші викиди NO_x порівняно з базовим рівнем чистого полум'я, що є позитивним екологічним ефектом.

Крім того, у роботі [28] Саміран експериментально та чисельно проаналізував структуру факела та реакції завихрення попередньо змішаного полум'я синтез-газу, збагаченого як CO, так і H_2 . Було протестовано та змодельовано чотири різні типи синтетичних газів із різним вмістом водню (H_2). Дослідження виявило ключові відмінності у процесі горіння, залежно від домінуючого компонента:

- Полум'я, збагачене CO: створює значно вищу пікову температуру, має суттєво більшу довжину факела та продукує порівняно велику кількість NO в реакційній зоні.

- Полум'я, збагачене H₂: характеризується нижчою піковою температурою та меншим утворенням NO.

Ці результати підкреслюють, що висока температура горіння, спричинена CO, є прямою причиною збільшення утворення NO (через термічний механізм), тоді як H₂ діє як більш "чистий" компонент, що горить швидше та при менших температурах.

Дослідник Хабіб (Habib) у роботі [29] провів чисельне дослідження характеристик дифузійного горіння та викидів у великому двоопальниковому енергетичному котлі потужністю 200 МВт, який працював на суміші синтез-газу та метану (CH₄). Це дослідження мало на меті оптимізацію процесу спільного спалювання. Були розглянуті різні склади синтез-газу, що спалювався з повітрям, із варіюванням співвідношення CO/H₂ на рівнях 67/33%, 50/50% і 33/67%.

Ключові висновки щодо характеристик полум'я та температури:

Склад CO/H₂ = 33/67% (збагачений воднем) сформував найкоротше полум'я порівняно з іншими варіантами. Загалом, полум'я синтез-газу, збагаченого воднем (H₂), мало набагато меншу довжину факела, що пояснюється високою швидкістю дифузії та реакційною здатністю водню.

- Натомість, полум'я, збагачене монооксидом вуглецю (CO), призводило до значно вищої пікової температури горіння у котлі.

Висновки щодо Емісії NO_x та Оптимізації:

- Саме полум'я, багате на CO, генерувало вищий рівень емісії NO_x через відносно високу пікову температуру в котлі, що є прямим наслідком дії термічного механізму NO_x.

- Також було виявлено, що викиди NO_x зменшуються приблизно на 30% при збільшенні кількості надлишкового повітря з 5% до 25% [29]. Це зниження, хоча й неочікуване для деяких систем, може бути пояснене кращим охолодженням зони горіння та розбавленням.

- Серед усіх протестованих композицій синтез-газу, склад $\text{CO}_2 = 50/50\%$ забезпечив найнижчі викиди NO_x при найкращих характеристиках горіння (тобто оптимальному балансі температури та довжини факела).
- Крім того, розрахунки показали затримку згорання у випадку спалювання чистого метану порівняно зі спалюванням синтез-газу, що підтверджує, що синтез-газ є більш реакційноздатним паливом.

У своєму експериментальному дослідженні [30] Саху (Sahu) вивчав розподіл оксиду азоту (NO) у протитечійному попередньо незмішаному полум'ї синтез-газу, варіюючи співвідношення H_2/CO від слабо до сильно збагаченого CO . Отримані експериментальні дані чітко продемонстрували, що утворення NO_x суттєво залежить як від температури полум'я, так і від швидкостей горіння. Було виявлено, що синтез-газ із низьким вмістом CO (і, відповідно, високим вмістом H_2) виробляє набагато вищі викиди NO_x при менших швидкостях порівняно з полум'ям синтез-газу, багатого на CO . Аналіз чутливості щодо впливу метану (CH_4) на шляхи утворення NO вказує на критичну необхідність врахування вуглеводневих компонентів (C_xH_y) у механізмах реакцій для точного моделювання утворення NO навіть у сумішах H_2/CO , що містять незначні кількості вуглеводнів.

Пак (Park) у роботі [31] провів чисельний аналіз впливу складу синтез-газу та його розведення азотом (N_2) на характеристики горіння та викиди NO для синтез-газів, багатих на CO , H_2 та CH_4 , у конфігурації протитечійного дифузійного полум'я. Було детально обговорено основні характеристики та точну структуру полум'я нерозбавленого і розбавленого N_2 синтез-газу, включно з температурою, мольними частками та швидкістю утворення NO . Було виявлено, що у факелах, сильно розбавлених N_2 , швидкість утворення NO підвищується внаслідок збільшення вмісту H_2 та CH_4 і зменшення вмісту CO у паливі. При посиленні розведення азотом, за рахунок механізмів швидкого і повторного спалювання, внесок NO зменшувався для синтез-газу, багатого на CH_4/CO , і збільшувався для синтез-газу, багатого на H_2 . У дослідженні систематично визначено домінуючі фізичні процеси і хімічні реакції, які впливають на точну структуру полум'я та емісію NO в реальних умовах спалювання синтез-газу.

Ці наукові роботи вказують на те, що полум'я синтез-газу, яке має високий вміст монооксиду вуглецю (CO), потенційно може призводити до значного утворення забруднюючих речовин і парникових газів, оскільки висока температура горіння CO стимулює термічний NO_x . Для боротьби з цим було доведено, що в режимах горіння з помірно-інтенсивним розведенням і низьким вмістом кисню (MILD-горіння) відбувається неявне скорочення термічних оксидів азоту (NO_x), оскільки ключовою особливістю цього процесу є зниження пікової температури полум'я [32, 33].

У дослідженні [32] Хуан (Huang) вивчав критичні операційні параметри, що впливають на характеристики горіння в аксіальній ступінчастій камері згорання, яка працювала в режимі помірно-інтенсивного розведення і низького вмісту кисню (MILD-горіння). У цій інноваційній конфігурації вторинне повітря спочатку змішувалося з димовими газами із зони їх утворення, щоб створити гарячий та розведений окисник (з низьким вмістом O_2), який потім змішувався з вторинним паливом.

За допомогою експериментальних вимірювань були отримані загальні сигнатури полум'я, розподіл ОН-радикалів (ключовий індикатор реакційної зони) та викиди відхідних газів, тоді як процес змішування вторинного палива та окисника досліджувався чисельно.

Було встановлено, що збільшення швидкості введення вторинного палива сприяє швидшому змішуванню з окисником, що має низку наслідків:

- Це збільшує протяжність факела та знижує пікову температуру полум'я, роблячи теплові поля більш рівномірними.
- Такий ефект призводить до менших викидів NO_x (через пригнічення термічного NO_x), що є головною перевагою MILD-горіння.
- Водночас, це викликає більше падіння тиску в системі та збільшення утворення CO, оскільки інтенсивне змішування може скоротити час перебування палива в зоні високих температур, необхідний для повного догорання CO.

Крім того, аналіз показав, що вища температура попереднього нагріву повітря призводить до збільшення максимальної температури полум'я та, як наслідок, збільшення утворення NO_x . Однак, це підвищення температури зменшує

викиди CO, оскільки покращує швидкість та повноту окислення чадного газу. Таким чином, оптимальний режим роботи MILD-горіння вимагає ретельного балансування швидкості подачі палива, температури попереднього підігріву та мінімізації падіння тиску.

У дослідженні [33] Мардані (Mardani) провів чисельне моделювання з метою вивчення впливу додавання водню (H_2) до метану (CH_4) та синтез-газу в умовах спалювання з низьким вмістом кисню (MILD-горіння), використовуючи спеціально налаштований пальник. У роботі детально аналізувався вплив розведення окисника (зменшенням вмісту O_2) та числа Рейнольдса (Re) струменя палива на поле реактивного потоку. Було виявлено, що збільшення числа Рейнольдса струменя палива, яке відображає інтенсивність турбулентності, призводить до розширення зони горіння та її зміщення в осьовому напрямку (подовження факела).

Чисельні результати також показали, що об'єм високотемпературного згорання збільшується внаслідок підвищення вмісту водню. З іншого боку, зниження вмісту окисника (розведення повітря) наближає процес горіння до стану з нестачею кисню, що є основною передумовою для MILD-режиму. Крім того, було встановлено, що підвищення рівня водню виявилось набагато ефективнішим для синтез-газу, ніж для метану, в умовах низькокисневого горіння. Це пояснюється тим, що синтетичний газ демонструє більшу чутливість до збагачення воднем, ніж чистий метан, що робить водень корисною добавкою до синтез-газу з точки зору переваг, які надає MILD-режим (тобто ефективніше згорання при низьких NO_x).

Таким чином, ці та інші численні наукові роботи [32, 33] вказують на те, що велика кількість науковців зосереджують свої зусилля на розробці та оптимізації технологій спалювання синтез-газу. Головною метою цих інженерних рішень є мінімізація викидів забруднюючих речовин (NO_x , CO) та одночасне забезпечення вищої ефективності самого процесу горіння, що є критично важливим для сталого енергетичного майбутнього.

1.3.2 Розробка математичних (або комп'ютерних) моделей для опису спалювання синтез-газу

Альтернативне паливо з біомаси є складною багатокомпонентною сумішшю вуглеводневих молекул. При застосуванні традиційних методів, моделі хімії горіння цих великих вуглеводнів стають надзвичайно складними, потенційно включаючи сотні хімічних реакцій та тисячі проміжних речовин. Хоча такі деталізовані механізми і можуть надати цінну інформацію про хімію горіння, існують значні труднощі, пов'язані з необхідністю визначення великої кількості точних термодинамічних, кінетичних і транспортних даних для всіх залучених хімічних речовин та реакцій. Ця складність посилюється обмеженою кількістю точних експериментальних вимірювань і теоретичних розрахунків для багатьох проміжних сполук.

Для імітації складного процесу згоряння палива ці детальні хіміко-кінетичні механізми зазвичай відтворюються у спеціалізованому програмному забезпеченні, зокрема Ansys Fluent, де розробляється комплексна модель Обчислювальної гідродинаміки (CFD).

Методології CFD та кінетичного моделювання

Ряд зазначених наукових досліджень включають не лише аналітичні результати, але й розгорнуті дво- та тривимірні чисельні моделі.

Наприклад, у раніше згаданій статті [29] для моделювання спільного спалювання синтез-газу з повітрям у великому промисловому котлі було використано детальний механізм кінетики реакції. У цій роботі представлена тривимірна модель топки котла, для розрахунку якої було застосовано структуровану сітку, що складалася приблизно з 400 000 комірок. Щоб мінімізувати помилки дифузії та забезпечити точність результатів, сітка була ущільнена в областях із високим градієнтом властивостей (наприклад, зона полум'я) та поблизу стінок. Для знаходження розв'язку диференціальних рівнянь у частинних похідних для законів збереження маси, імпульсу, енергії та випромінювання використовувалася комерційна програма ANSYS Fluent 14.

Іноземні вчені застосовують не лише комерційне програмне забезпечення. Наприклад, чисельне моделювання протитечійного полум'я синтез-газу без

попереднього змішування було виконано за допомогою програми OPPDIF [30]. Ця програма, написана мовою Fortran, спеціально розроблена для моделювання полум'я ламінарних струменів палива і повітря, розташованих один проти одного. Математична модель, закладена в OPPDIF, спрощує двовимірне осесиметричне поле потоку до одновимірного формулювання завдяки використанню перетворення подібності. Модель дозволяє точно прогнозувати профілі швидкості, температури та мольну частку вздовж центральної лінії між двома соплами пальника.

Перед проведенням параметричного дослідження [31], для оцінки прогностичної здатності моделі утворення NO_x у дифузійному полум'ї синтез-газу/повітря, було виконано тестування оптимізованого хімічного механізму GRI-Mech 3.0. Цей механізм, розроблений для моделювання процесів горіння метану, використовувався для оцінки утворення NO. Чисельні результати показали, що GRI 3.0 забезпечує добру загальну узгодженість з експериментально вимірними максимальними рівнями та розподілом мольної частки NO у досить широкому діапазоні співвідношень $\text{H}_2/$ та швидкостей. Особлива увага була зосереджена на дослідженні впливу розведення азотом (N_2) на характеристики утворення NO_x у дифузійних факелах потрійного синтез-газу, багатого на CO, H_2 і CH_4 , при різних його складах.

Для моделювання поля потоку всередині зони горіння з низьким вмістом кисню (MILD-горіння) при різних швидкостях введення вторинного палива використовувалося комерційне програмне забезпечення FLUENT [32]. Розрахунок поля потоку здійснювався за допомогою стаціонарного, неявного методу кінцевих об'ємів. У моделі були реалізовані стандартні функції стінки (Wall Functions), що забезпечило більш точне прогнозування поля потоку в процесі змішування струменів. Перед початком основних розрахунків було проведено незалежне від сітки дослідження (Grid Independence Study) шляхом порівняння контурів розподілу температури у центральній площині та вздовж центральної лінії камери. В результаті для моделювання була обрана структурована сітка, що складалася приблизно з 730 000 комірок, що гарантувало високу точність чисельних результатів.

Висновок до розділу 1

Перший розділ кваліфікаційної роботи являє собою ґрунтовний огляд різновидів біопалива та комплексний аналіз зарубіжної літератури щодо використання альтернативних видів палива у світовій енергетиці. Хоча останнім часом виникають стратегічні питання щодо стабільності виробництва біомаси та її конверсії на паливо, пов'язані зі змінами у землекористуванні та потенційним впливом на продовольчу безпеку, біомаса, як добре керований відновлюваний ресурс, все ж здатна зробити суттєвий внесок у розвиток сталої економіки. Належна утилізація відходів та використання біомаси як енергоносія здатні покращити екологічний стан навколишнього середовища та значно знизити енергетичну залежність країни від викопного палива.

Проведений огляд новітніх досягнень дозволив визначити пріоритетні напрямки у розвитку використання біомаси. Зокрема, більшість дослідників, які працюють із синтетичними газами (Syngas), пропонують практику додавання горючих газів різного складу до продуктів газифікації для подальшого підвищення калорійності та стабільності горіння в енергетичних установках. В результаті аналізу наукових робіт з'ясовано, що значна увага приділяється характеристикам горіння деревних та агропелет, а також біомаси і синтез-газу, зокрема питанням емісії шкідливих оксидів (NO_x , CO) у продуктах спалювання.

Незважаючи на велику кількість досліджень, у сфері моделювання існує дефіцит інформації щодо порівняльного аналізу згоряння різних, але однотипних, видів біопалива (наприклад, пелет з різних аграрних залишків) в однакових умовах. З огляду на цю прогалину, стає актуальною розробка математичного моделювання спалювання біопалива, яке дозволить об'єктивно оцінити екологічні та енергетичні показники роботи побутового котла на альтернативному паливі з біомаси.

РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНИ ОГЛЯД CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ БІОЛОГІЧНОГО ПАЛИВА.

2.1 Характерні риси моделювання процесів з твердим біопаливом

Рівняння, що описують процес спалювання палива, є надзвичайно складними для аналітичного розв'язання, оскільки вони вимагають одночасного інтегрованого врахування багатьох фізичних та хімічних явищ: хімічних перетворень компонентів (кінетика), гідродинаміки (зокрема, турбулентного проходження потоку палива та повітря) та теплообміну (конвекція, випромінювання) всередині топки котла. Проведення таких детальних досліджень на основі фізичних експериментів є технічно важким, ресурсозатратним і дуже дорогим завданням.

У цій ситуації CFD-моделювання (Обчислювальна гідродинаміка) стає доречною, потужною та значно менш витратною альтернативою для глибокого дослідження процесів горіння палива. Обчислювальна гідродинаміка є незамінним та доступним інструментом для оптимізації процесів горіння, оскільки вона здатна точно фіксувати та прогнозувати параметри цього процесу у просторі та часі. Однак, ефективне застосування CFD вимагає глибокого розуміння доступних чисельних моделей згоряння.

Математичний опис горіння є складним, тому що він поєднує в собі такі дисципліни, як механіка рідини, масообмін, хімічна кінетика та термодинаміка. Для створення дійсної та фізично коректної моделі необхідно, щоб рівняння механіки рідини та термодинамічні рівняння збереження (маси, імпульсу та енергії) були обов'язково задоволені у кожній точці розрахункової області.

Крім того, спалювання твердого палива (зокрема, пелет) є багатофазним процесом, оскільки він включає складну взаємодію твердої та газоподібної фаз (частинки палива та окисник/продукти згоряння). Для адекватного врахування цієї багатофазної природи горіння твердого палива у CFD-кодах використовується Модель дискретної фази (DPM – Discrete Phase Model) [34]. Модель DPM розглядає траєкторію та взаємодію безперервної фази (газоподібна речовина) з дискретною фазою (тверді частинки, як-от пелети або їхні фрагменти) протягом усього процесу горіння, включаючи стадії сушіння, піролізу та гетерогенного окислення.

Першим і критично важливим етапом у процесі спалювання біомаси є сушіння частинок, яке полягає у видаленні внутрішньої та поверхневої вологи з твердого палива. Для досягнення максимально точного CFD-моделювання цього процесу використовуються логічні аргументи, що відповідають фізичним законам. Оскільки випаровування води є функцією від місцевих параметрів тиску та температури, частинки біомаси, по суті, починають виділяти вологу у вільному стані вже при температурі 25°C, хоча і з дуже низькою швидкістю [34].

Рівняння енергії, яке моделюється в CFD, повинно розв'язувати комплекс взаємопов'язаних процесів, що включає теплопровідність (передача тепла всередині частинки), конвекцію (передача тепла від газової фази), теплообмін випромінюванням та ентальпію пароутворення (приховане тепло) під час сушіння. Оскільки водяна пара, що утворюється в процесі сушіння, повинна бути відведена від поверхні частинок у газову фазу, в моделі також необхідно враховувати рівняння дифузії для опису масообміну. Отже, сушіння твердого палива базується на нагріванні та подальшому перенесенні молекул H₂O з внутрішньої структури та поверхні частинок біомаси

Вихід летких речовин (процес піролізу) починається, коли температура частинки палива досягає температури піролізу (випаровування летких) за умови відсутності кисню. У науковій літературі представлено багато різних моделей [34], для опису цього процесу (наприклад, одно- чи багатостадійні моделі), оскільки критично важливо точно знати швидкість вивільнення летких і їхній кінцевий склад (метан, водень, СО тощо).

Існує думка, що вихід летких речовин починається вже під час сушіння частинок, оскільки деякі легкі леткі компоненти (наприклад, низькомолекулярні вуглеводні) можуть передчасно залишати паливо. Це ускладнює точне кількісне визначення коефіцієнта виходу летких речовин у перерахунку на масу частинок та їхні компоненти.

На жаль, один зі способів врахувати вивільнення летких речовин у CFD-моделюванні — це фіксувати єдину температуру випаровування (яка часто використовується для спрощення). Хоча ця температура зазвичай є достатньо високою, щоб гарантувати випаровування залишкової вологи, вона, своєю чергою,

спотворює фактичну кінетичну швидкість виходу летких речовин, що є головним недоліком спрощених моделей. Коли температура частинок досягає цієї фіксованої температури, до енергетичного рівняння моделі додається прихована теплота випаровування летких компонентів.

Для моделювання складного процесу виходу летких речовин (піролізу) з твердого палива використовується низка підходів [34]. Найпростішими серед них є емпіричні моделі, які застосовують загальну кінетику і використовують вирази Арреніуса для зв'язку швидкості втрати ваги частинки з температурою. Хоча ці прості моделі здатні точно передбачити загальні коефіцієнти виходу летких речовин на основі вхідних параметрів, складніші моделі (наприклад, моделі конкуруючих реакцій) краще прогнозують детальний хімічний склад цих летких газів.

Леткі речовини є основним носієм енергії при спалюванні біомаси та являють собою складну суміш, що складається з CO, CO₂, H₂O, CH₄, H₄ та інших органічних і неорганічних продуктів. Однак, у CFD-моделюванні ці леткі гази зазвичай для спрощення групуються в один «штучний» вид (наприклад, C_nH_xO_z). Оскільки леткі речовини є газами, для моделювання горіння біомаси застосовуються ті самі моделі гомогенного спалювання, що й для газоподібної фракції вугілля.

Основна невизначеність у моделюванні пов'язана з точним визначенням складу високотемпературних летких речовин. Для використання моделей гомогенного горіння необхідно враховувати механізми хімічних реакцій. Найпростішим є загальний одноетапний механізм реакції, який використовує просте рівняння без проміжних сполук [34]. Для більш точного моделювання та врахування неповного згоряння застосовується загальний двоетапний механізм реакції, де монооксид вуглецю (CO) розглядається як проміжна речовина, що є ключовим для прогнозування емісії.

Після вивільнення летких речовин вуглецева фракція, що залишилася (кокс), піддається поверхневим хімічним реакціям, які називаються окисненням вугілля (гетерогенне горіння). Цей процес відбувається при вищих температурах, ніж піроліз, тому температура частинок має бути вищою за температуру випаровування/піролізу, щоб ця реакція відбулася.

Прості реакції, представлені в рівняннях [34], використовуються для опису хімічних перетворень, що відбуваються поблизу поверхні обуглення. На стадії гетерогенного згоряння форма частинок палива стає більш виразною. Це має вирішальне значення, оскільки частинки біомаси мають різноманітні несферичні форми та розміри, які, як правило, забезпечують більшу площу поверхні та значну пористість. Ці фактори, своєю чергою, посилюють потік кисню до реакційної зони, прискорюючи горіння коксу та його вигоряння.

У програмному забезпеченні ANSYS Fluent для моделювання складного процесу горіння, що включає шар твердого палива, використовується гібридний підхід [35]. Цей підхід ефективно розділяє загальну область моделювання на дві взаємодіючі частини: шар палива та надшаровий простір (простір над шаром).

1. Шар Твердого Палива (Пориста Зона): Фізичні та хімічні явища, що відбуваються у твердій фазі (наприклад, сушіння, піроліз, гетерогенне горіння коксу), розв'язуються за допомогою спеціальної моделі шару палива (Bed Model). Цей шар моделюється як пориста зона (пористе дисперсійне середовище), де властивості твердої фази характеризуються скалярними величинами (наприклад, локальна температура, щільність та вміст вологи). Ці скалярні величини являють собою локальні усереднені значення для кожної обчислювальної комірки. Ключова перевага цього підходу полягає в тому, що він дозволяє працювати з сітками, розмір комірок яких може бути як більшим, так і меншим за розмір окремих частинок палива, оскільки кожна комірка представляє не окрему частинку, а усереднену за об'ємом область шару.

2. Надшаровий Простір: У цьому просторі визначається виключно газова фаза. Тут відбуваються лише гомогенні реакції (спалювання летких газів, CO та H_2), які моделюються за допомогою звичайної CFD-моделі (розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса).

У публікації [35] наголошується, що для створення комплексного та достовірного моделювання критично важливо використовувати підходи, які здатні відобразити еволюцію кожної окремої частинки палива та її вплив на потік газу в котлі. Для моделювання фізичних явищ, пов'язаних із твердими частинками та їхньою механікою (наприклад, рух та деформація шару), застосовується Метод

скінченних елементів (MCE – Finite Element Method). Таким чином, комбінація CFD (Обчислювальної гідродинаміки) та MCE дає можливість моделювати складні системи, де рідина (газ) взаємодіє з рухомими твердими частинками, забезпечуючи точний опис фізико-хімічних процесів у шарі.

Основні підходи до моделювання горіння в газовій фазі ґрунтуються на припущенні, що швидкість хімічних реакцій обмежується процесом турбулентного змішування компонентів [34]. Це означає, що як швидко б не відбувалися самі хімічні реакції, загальний темп горіння лімітується тим, наскільки швидко паливо і окисник (повітря) можуть змішатися на молекулярному рівні у високотурбулентному потоці.

У цьому контексті Модель вихрового розсіювання (EDM – Eddy-Dissipation Model) виходить з припущення, що темп хімічної реакції є значно швидшим, ніж темп турбулентного змішування. Ця модель припускає, що швидкість хімічних реакцій прямо пропорційна часу, необхідному для змішування реагентів на молекулярному рівні. Через турбулентний характер горіння, інформацію про час змішування надають властивості вихрових процесів (вихрова дисипація).

Однак, EDM має суттєвий недолік — відсутність універсальності констант. Застосування багатокрокового механізму хімічних реакцій (які використовують швидкості Арреніуса, унікальні для кожної окремої реакції) із цією моделлю може давати некоректні результати, оскільки вона ігнорує реальну кінетику. Це означає, що для кожного окремого процесу потрібна додаткова верифікація та калібрування констант.

CFD-моделювання (Обчислювальна гідродинаміка) забезпечує розв'язання для газової фази протягом усіх реакцій горіння та інших хімічних перетворень, що відбуваються в цій фазі (гомогенне горіння летких речовин) під час моделювання котлів, які працюють на біомасі [35].

Програмне забезпечення Ansys Fluent містить різноманітні моделі, призначені для опису різних процесів і явищ, що відбуваються в газовій фазі систем з горінням. Для отримання рішення необхідно розв'язати інтегровану систему диференціальних рівнянь у частинних похідних, що включає рівняння збереження маси, імпульсу, енергії, турбулентності та переносу частинок (останнє — для

дискретної фази) . Тільки повний розв'язок цієї системи дозволяє точно описати термодинамічний та гідродинамічний стан газової фази.

Для забезпечення високої точності CFD-моделювання було здійснено ретельний вибір чисельних моделей для опису ключових фізичних процесів.

1. Моделювання Турбулентності: Для опису турбулентного протікання газового потоку була обрана модель k-ε типу "realizable" з покращеною обробкою стін (enhanced wall treatment) [35]. Цей вибір є обґрунтованим, оскільки така конфігурація моделі k-ε вже довела свою ефективність та надійність у моделюванні складних процесів спалювання біомаси, забезпечуючи краще прогнозування потоку в зоні біля стінок і сепарації.

2. Моделювання Випромінювання: Теплове випромінювання — критично важливий механізм теплообміну у високотемпературних топках — описувалося за допомогою моделі дискретних ординат (Discrete Ordinates Model, DO). Ця модель була спеціально модифікована (наприклад, шляхом застосування P-1 моделі або її гібридів) для забезпечення коректної взаємодії з твердою фазою (шаром палива та летючими частинками), оскільки випромінювання відіграє ключову роль у нагріванні палива.

3. Моделювання Горіння (Хімічна Кінетика): Для одночасного врахування обмежень, які накладаються як турбулентним змішуванням, так і швидкістю хімічних реакцій (кінетикою), було застосовано модель FR-ED (Finite Rate - Eddy Dissipation). Ця гібридна модель інтегрує підхід скінченної швидкості (Finite Rate) (який описує реальну кінетику реакцій Арреніуса) та модель вихрового розсіювання (Eddy Dissipation, EDM) (яка описує швидкість змішування). Таке поєднання дозволяє більш точно контролювати швидкість, з якою споживаються реагенти, уникаючи припущень, що горіння відбувається миттєво.

Обрана комплексна модель була валідована (перевірена) шляхом імітації топки великомасштабного котла на біомасі потужністю 4 МВт, який був оснащений колосниковою решіткою [35]. Сам реальний котел складається з топки і розташованого на її виході теплообмінника. Однак, оскільки теплообмінник не був включений у чисельне моделювання (що є поширеною практикою для

зниження обчислювальної складності), досліджувалася лише піч (топка) (зображено на рис. 2.1).

Ключові характеристики об'єкта валідації:

- Тип Пальника: Поворотна колосникова решітка.
- Геометричні параметри решітки: Ширина 1,7м і довжина 5 м.
- Конструкція: Решітка складається з 11 рухомих рядів колосників. Рух цих колосників забезпечує просування та перемішування палива (зокрема, його твердої фази), що необхідно враховувати при моделюванні шару.

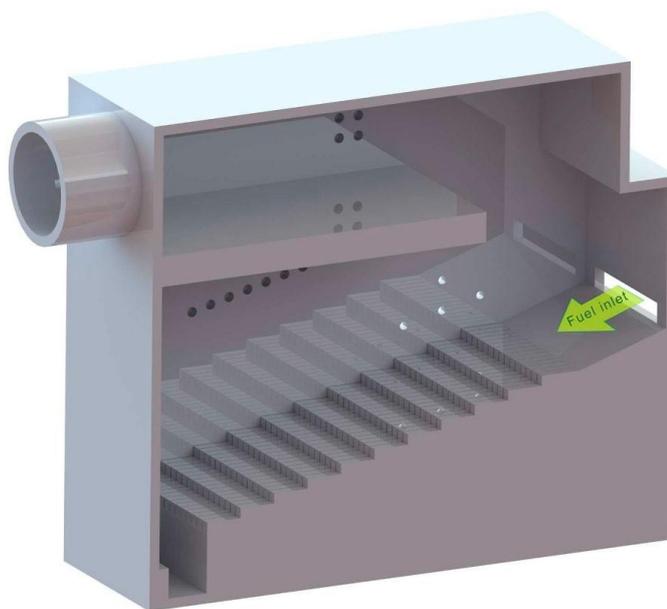


Рисунок 2.1 – Модель топки котла, що використовує тривимірний простір і обладнана колосниковою решіткою. [35]

Котлом можна ефективно керувати при різних теплових навантаженнях шляхом регулювання його робочих параметрів, таких як швидкість подачі палива, витрата повітря та його розподіл [35]. Наприклад, при валідації чисельної моделі, описаній у попередньому розділі, моделювання, включно з вимірюванням температурних профілів по висоті шару палива, проводилося з використанням робочих параметрів, які відповідали тепловому навантаженню 3,9 МВт (що становить майже повне навантаження для 4 МВт котла).

Наведені параметри CFD-моделювання (зокрема, Моделі дискретної фази (DPM), $k-\epsilon$ "realizable" турбулентність та модель випромінювання дискретних ординат (DO) також були використані для розробки тривимірної моделі горіння

твердого палива на електростанції за стаціонарних умов [36], а також для моделювання спалювання деревних пелет із застосуванням ступеневої подачі повітря [37]. Це підтверджує універсальність та надійність обраної методологічної бази.

У дослідженні [36] горіння твердого палива було змодельовано за допомогою Методу скінченних елементів (МСЕ), реалізованого через визначену функцію в комерційній програмі ANSYS Fluent 17.2. Незважаючи на використання стаціонарних умов (що спрощує розрахунок), завдяки спрощеним рівнянням переносу, властивості рідини (газової фази) розглядаються на основі взаємодії між змодельованими частинками і рідиною, подібно до того, як це відбувається при перехідних процесах.

Процес згоряння палива імітувався у промисловій камері згоряння електростанції потужністю 6,7 МВт (зображено на рис. 2.2). Ключові геометричні та операційні характеристики об'єкта моделювання:

- Розміри Камери: 5,9 м у ширину, 9,6 м у довжину та 4,2 м у висоту.
- Механізм Подачі Палива: Тверде паливо переміщується в камері за допомогою рухомої решітки від початку до кінця.
- Герметичність: Уся система спалювання є герметичною (ізолюваною від зовнішнього середовища).
- Режим Горіння: Тверде паливо спалювалося в субстехіометричних умовах (тобто в умовах збагачення паливом, коли коефіцієнт надлишку повітря $\alpha < 1$). Такий режим сприяє неповному згорянню, а газифікації, що призводило до вивільнення паливного газу (летких речовин) вздовж рухомої решітки.

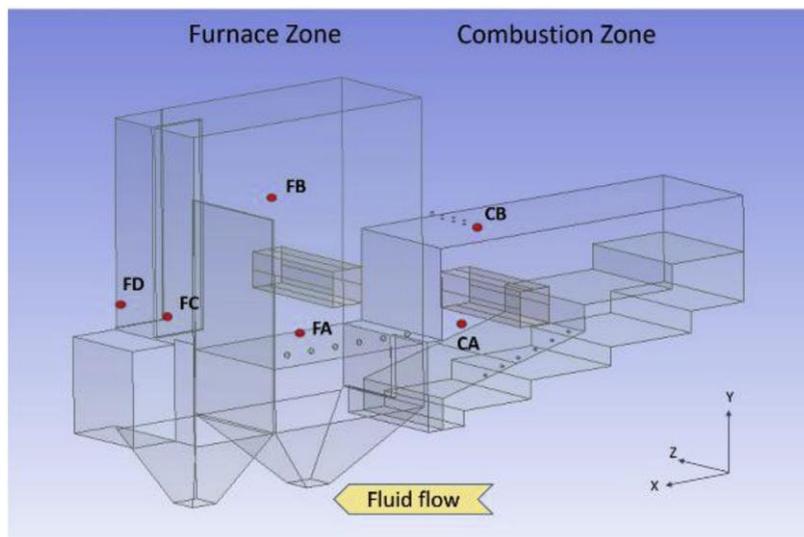


Рисунок 2.2 – Модель, що розглядає процеси горіння в печі шляхом виділення зони фактичного горіння і загального простору топки. [36]

На промисловій електростанції [36] процес був реалізований як двостадійне горіння. У першій камері, де тверде паливо спалювалося у субстехіометричних умовах (з нестачею повітря), тверде паливо випадало у вигляді золи лише у кінці камери згоряння. При цьому паливний газ (багатий на CO , H_2 та інші леткі речовини) надходив у піч, яка безпосередньо примикала до першої камери згоряння. У цій другій печі газ спалювався вже разом із вторинним повітрям у збідненому паливом стані (тобто в умовах надлишку повітря $\alpha > 1$). Усі задіяні процеси — включно з сушінням, виділенням летких речовин і спалюванням вуглецю (коксу) — відбувалися на межі між відповідними шарами (газовою фазою та твердим паливом).

Особливості моделювання твердої фази: Паливо було змодельовано у циліндричній формі з діаметром 0,01 м та довжиною 0,06 м. Для зниження обчислювального навантаження, дослідники застосували техніку зменшення кількості елементів (Parcel approach): 16 частинок твердого палива були згруповані, і було зроблено припущення, що вони перебувають в однаковому стані (тобто мають однакові властивості та швидкість реакції).

CFD-моделювання горіння у побутовому котлі на пелетах [37] було реалізовано шляхом впровадження двостороннього обміну між моделлю перетворення паливного шару (тверда фаза) та моделлю спалювання надшарової

газової фази. Для цього використовувалося програмне забезпечення ANSYS Fluent 2019 R3. Модель паливного шару була представлена через визначену функцію (User-Defined Function, UDF), яка керувала процесами сушіння та піролізу, а горіння газової фази моделювалося у надшаровому просторі за допомогою стандартних CFD моделей.

Технічні деталі розрахунку: Розрахунок стаціонарних станів виконувався за допомогою алгоритму SIMPLE для поєднання тиску і швидкості та просторової дискретизації другого порядку (що підвищує точність).

На відміну від деяких попередніх робіт, автори цієї статті створили більш детальне моделювання котла. Основні розміри розрахункової області, яка включала внутрішній об'єм котла, камеру згоряння та канали димових газів, становили $0,26 \times 0,86 \times 0,44$ м. Обчислювальна сітка складалася з 548,043 багатогранних комірок (Polyhedral cells) з високою мінімальною ортогональною якістю, що є критичним для забезпечення точності чисельних розрахунків.

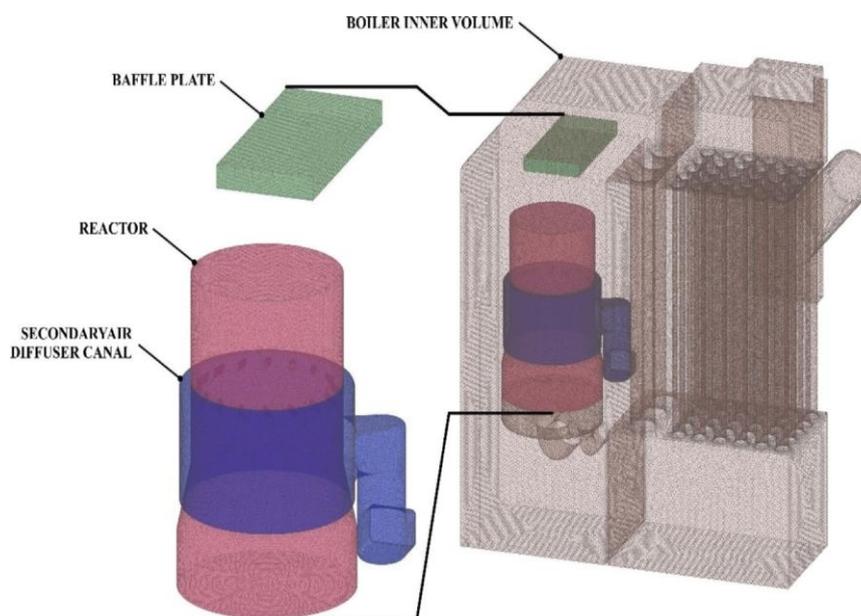


Рисунок 2.3 – Розрахункова сітка досліджуваного котла [37]

Обчислювальна сітка для моделювання пелетного котла [37] була структурно складною, складаючись із трьох внутрішніх об'ємів рідини (газової фази) та одного об'єму твердого тіла (стілки котла/перегородки). Зв'язки між областями рідини класифікувалися як внутрішні (де рідина вільно проходить) або як тонкі стінки (які є непроникними для рідини, але передають тепло за допомогою моделі

теплопередачі з'єднаної оболонки, що є важливим для точності). Перегородка (внутрішній елемент, наприклад, у теплообміннику) також брала участь у теплообміні, з'єднуючись із основною областю теплоносія котла.

Модель шару палива відігравала роль інтерфейсу, що надавав моделі CFD параметри входу горючого газу (летючих речовин) у надшаровий простір: температуру, масову витрату та склад для кожної зони. При цьому турбулентність на вході (для моделювання потоку повітря/газу) була встановлена на рівні 35%, а гідравлічний діаметр — 6 мм.

Використання CFD-моделювання дозволяє визначити оптимальні геометричні та технологічні параметри котельної установки, що сприятиме мінімізації утворення забруднюючих речовин (NO_x , CO) та досягненню вищої теплової ефективності. Навіть спрощені обчислювальні методи для моделювання складних явищ, що відбуваються в котлі на біомасі, можуть виявитися дуже корисними, за умови, що вони забезпечують надійні та достатньо точні прогнози.

У дослідженні [38] також представлено розрахунок горіння пелет із застосуванням скінченно-елементних CFD-моделей котла і пальника, які були створені у комерційному програмному пакеті Ansys Fluent. Метою цього моделювання було вдосконалення наявних пальників і розробка інноваційних конструкцій, які могли б забезпечити ефективну інтеграцію у більшість існуючих котлів, гарантуючи при цьому високу теплову ефективність і відповідність екологічним вимогам. Аналізу піддавалися деревні гранули, рослинні гранули із соломи ріпаку та гранули із бурякового жому.

Ключове методологічне правило: для підтвердження достовірності результатів чисельні дослідження завжди комбінуються з практичними експериментальними вимірюваннями. Чисельна частина роботи фокусується на моделюванні процесу спалювання біомаси, при цьому всі вхідні дані, необхідні для моделювання (наприклад, склад палива, кінетичні константи, граничні умови), отримуються з практичних експериментів. Експериментальне дослідження проводиться для двох ключових цілей:

1. Визначення параметрів, необхідних для моделювання процесу горіння палива.

2. Налаштування відповідного обладнання (наприклад, для забезпечення оптимального α).

Результати, отримані у роботі [38], свідчать про те, що комп'ютерна модель чутлива до теплофізичних властивостей реагуючих компонентів і кінетики реакцій. Однак, коректне задання цих вхідних даних дозволяє здійснювати досить точну оцінку аеродинамічної структури потоку у пальниках і в топці котла, що є важливим для оптимізації конструкції.

2.1.1 Виконання CFD-розрахунків (обчислень) для аналізу динаміки частинок твердого біопалива в Ansys Fluent

Для опису багатофазної природи згоряння твердого палива (взаємодії частинок біомаси з газовим потоком) використовується Дискретна фазова модель (DPM – Discrete Phase Model). Значні досягнення в обчислювальній механіці рідини створили міцну основу для глибокого розуміння динаміки таких складних багатофазних потоків.

Існує потужний підхід для чисельного розрахунку таких потоків – метод Ейлера-Лагранжа [39], який і є основою моделі дискретної фази Лагранжа у програмному пакеті Ansys Fluent. У цій моделі реалізовано наступний механізм:

1. Суцільна Фаза (Газ): Розглядається як безперервне середовище за допомогою підходу Ейлера. Її параметри (швидкість, тиск, температура) розраховуються шляхом розв'язання усереднених рівнянь Нав'є-Стокса.

2. Дисперсна Фаза (Частинки): Розглядається за допомогою підходу Лагранжа. Тверді частинки (пелети, фрагменти коксу, бульбашки або краплі) розв'язуються шляхом відстеження траєкторії великої кількості цих окремих елементів у вже розрахованому полі потоку суцільної фази.

Дисперсна фаза здатна до двостороннього обміну з суцільною фазою, обмінюючись імпульсом (аеродинамічний опір), масою (сушіння, піроліз) та енергією (теплообмін).

Рівняння руху частинок є основою для відстеження їхньої траєкторії в DPM. Програма Ansys Fluent визначає траєкторію частинки дискретної фази (наприклад, частинки біопалива) шляхом інтегрування балансу сил, які діють на цю частинку.

Цей розрахунок виконується саме у системі відліку Лагранжа (тобто, відстежуючи кожну частинку).

Баланс сил прирівнює інерцію частинки (масу, помножену на прискорення) до суми всіх зовнішніх сил, що на неї діють. Цей баланс сил може бути виражений відповідним диференціальним рівнянням:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho} + \vec{F} \quad (0.1)$$

де m_p , u_p , ρ_p , – відповідно маса, швидкість і густина твердої частинки;

m , u , ρ – відповідно маса, швидкість і густина рідкої фази;

F – додаткова сила, яка може суттєво впливати за певних обставин;

τ_r – час релаксації краплі або частинки, який розраховується так:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \quad (0.2)$$

де μ – молекулярна в'язкість рідини;

d_p – діаметр твердої частинки.

Хоча загальне рівняння балансу сил для частинки (рівняння руху) включає силу тяжіння (F_g), у програмному пакеті Ansys Fluent для моделі дискретної фази (DPM) гравітаційне прискорення за замовчуванням встановлено на нулі. Це налаштування відповідає вимогам нашого моделювання, оскільки в багатьох випадках (особливо у високошвидкісних турбулентних потоках, як у топці котла) аеродинамічний опір значно домінує над силами гравітації. Однак, у випадках, коли сила тяжіння є суттєвою (наприклад, для великих та важких частинок біомаси на колосниковій решітці), її необхідно активувати вручну [39].

Обертання частинки є невід'ємною частиною її руху і здатне суттєво впливати на її кінцеву траєкторію у рідині (газі), особливо у вихрових та турбулентних потоках. Вплив цього обертання стає особливо значущим для великих та важких

частинок палива, які мають високі моменти інерції (як-от пелети або брикети). Ігнорування обертання частинок під час DPM-моделювання може призвести до того, що розраховані траєкторії будуть істотно відрізнятися від фактичних, особливо через відсутність врахування таких ефектів, як сила Магнуса (сила, що виникає при обертанні тіла в потоці рідини).

Щоб врахувати цей ефект і підвищити точність моделі, необхідно розв'язувати додаткове диференціальне рівняння для кутового моменту частинки (рівняння крутного моменту). Це рівняння пов'язує зміну кутового моменту частинки з сумою крутних моментів (M), що діють на неї (наприклад, момент, спричинений тертям або силами зсуву на поверхні) рівняння крутного моменту:

$$I_p \frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{d_p}{2} \right)^5 C_\omega |\vec{\Omega}| \cdot \vec{\Omega} = \vec{T} \quad (0.3)$$

де I_p , ω_p – відповідно момент інерції і кутова швидкість частинки;

C_ω – коефіцієнт опору обертання;

T – крутний момент, що прикладений до частинки в області рідини;

Ω – відносна кутова швидкість, яка розраховується так:

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{u} - \vec{\omega}_p \quad (0.4)$$

У межах моделі Ейлера-Лагранжа для точного опису взаємодії твердих частинок (наприклад, пелет біомаси) з газовою фазою доступний широкий ряд законів для розрахунку коефіцієнтів опору частинок (C_D) [39]. Ці закони необхідні для обчислення сили аеродинамічного опору (F_D), яка є домінуючою силою, що діє на частинки у потоці.

Ці закони включають:

- Закон сферичного та несферичного опору: Застосовується для частинок різної форми та розміру.

- Закон Стокса-Каннінгема: Враховує вплив розміру частинки та вільного пробігу молекул газу, особливо для дуже малих частинок (поправка на Кнудсена).
- Закон високого числа Маха: Необхідний для потоків, де швидкість частинок наближається або перевищує швидкість звуку.
- Теорія моделі динамічного опору: Застосовується для більш складних випадків, де опір може змінюватися динамічно.
- Спеціалізовані закони опору: Включаючи закони для моделі щільної дискретної фази (де враховується взаємодія частинок), закони опору для бульбашкового потоку та Закон опору обертання (який враховує вплив кутової швидкості частинки).

Вибір конкретного закону опору критично залежить від числа Рейнольдса частинки (Re_p), її форми та умов потоку.

Рівняння, що описують траєкторію частинки (баланс сил), а також будь-які допоміжні диференціальні рівняння, які моделюють передачу тепла чи маси (наприклад, швидкість випаровування вологи або піролізу) до або від частинки, розв'язуються шляхом поетапного інтегрування через дискретні часові кроки.

Інтегрування часу у рівнянні руху (2.1) (баланс сил) дозволяє визначити швидкість частинки у кожній точці вздовж траєкторії. Сама траєкторія прогнозується за певною залежністю. Точність цього інтегрування є вирішальною для достовірності моделювання. У моделях спалювання біомаси ці кроки повинні бути достатньо малими, щоб точно фіксувати не лише рух, але й швидкість протікання термохімічних перетворень (сушіння, піроліз).

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (0.5)$$

У рамках моделі дискретної фази (DPM) для точного відстеження поведінки частинок палива використовується система взаємопов'язаних звичайних диференціальних рівнянь. Зокрема, рівняння (2.1), яке описує баланс сил і визначає лінійний рух (траєкторію) частинки (через прискорення), та рівняння (2.5), яке,

ймовірно, описує баланс крутних моментів і визначає кутове обертання частинки, формують систему пов'язаних звичайних диференціальних.

Рівняння (2.1), яке відображає баланс сил (II закон Ньютона), може бути представлене в такій загальній формі, де інерція частинки прирівнюється до суми всіх сил, що на неї діють.

Це рівняння, а також рівняння (2.5) (що описує крутний момент) та інші допоміжні рівняння (наприклад, для масо- та теплообміну), є пов'язаними через параметри, що залежать від швидкості та положення частинки, а також від параметрів газової фази (наприклад, температура газу, що впливає на швидкість піролізу). Їхнє одночасне інтегрування у часі дозволяє CFD-моделі точно прогнозувати термохімічну еволюцію та динаміку руху частинок біомаси.

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{u - u_p}{\tau_r} + a \quad (0.6)$$

де a – вираз, що містить прискорення за рахунок усіх інших сил, крім сили опору.

Система диференціальних рівнянь, що описує динаміку частинки — рівняння (2.1) (баланс сил) та, ймовірно, рівняння (2.5) (баланс крутних моментів) — є основою для прогнозування траєкторії. Ця система може бути розв'язана для констант швидкості (u), прискорення (a) та кутової швидкості (w) як за допомогою аналітичного інтегрування (для простих випадків), так і з використанням чисельних схем дискретизації (для складних CFD-моделей) [39]. Останній метод передбачає покрокове розв'язання на дискретних часових інтервалах.

У програмі Ansys Fluent вплив турбулентності рідинної фази на рух дискретних частинок (їхнє розсіювання) можна прогнозувати, використовуючи два основні підходи [39]:

1. Модель Стохастичного Відстеження (Random Walk Model): Вона враховує вплив миттєвих турбулентних коливань швидкості на траєкторії частинок за допомогою стохастичних (випадкових) методів. Ця модель доступна також для врахування процесів генерації або розсіювання турбулентності в суцільній фазі.

2. Модель Хмари Частинок (Particle Cloud Model): Ця модель відстежує статистичну еволюцію групи (хмари) частинок навколо однієї середньої траєкторії. У ній концентрація частинок у хмарі описується за допомогою функції щільності ймовірності Гауса (PDF) відносно цієї середньої траєкторії.

Модель турбулентності Realizable k-ε — це вдосконалена версія стандартної моделі k-ε, яка була обрана для моделювання турбулентності в топці [35]. Вона відрізняється від стандартної моделі тим, що включає альтернативне математичне формулювання для турбулентної в'язкості (μ_t). Крім того, її модифіковане рівняння переносу для швидкості дисипації ε було виведено з точного рівняння, яке описує перенос середньоквадратичної флуктуації завихреності [39].

Важливі переваги та обмеження:

- Перевага: Модель Realizable k-ε містить додатковий ефект, що враховує середнє обертання при визначенні турбулентної в'язкості (див. рівняння 2.7-2.8), і демонструє кращу поведінку порівняно зі стандартною k-ε моделлю в ситуаціях з одиничною рухомою системою відліку [39].
- Обмеження: Модель може генерувати нефізичні турбулентні в'язкості в розрахункових областях, які містять одночасно обертові та нерухомі зони рідини (наприклад, при використанні численних систем відліку або обертових ковзних сіток). Через цей характер модифікації, її застосування до сценаріїв з кількома системами відліку вимагає обережності.

Вихрова в'язкість (μ_t) обчислюється за наступним рівнянням:

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (0.7)$$

де k – кінетична енергія турбулентності;

ε – швидкість дисипації.

Різниця між Realizable k-ε і стандартною k-ε моделями полягає в тому, що величина C_μ більше не є постійною. Вона обчислюється так:

$$C_{\mu} = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (0.8)$$

де A_0, A_s – константи моделі, які дорівнюють відповідно 4,04 і $\sqrt{6} \cos\varphi$.

Константа турбулентної в'язкості C_{μ} (що використовується, зокрема, у моделі Realizable k- ε) є функцією, яка залежить від таких параметрів потоку:

- Середні швидкості деформації та обертання середовища.
- Кутова швидкість обертання системи (якщо система координат або зона рідини обертається).
- Поля турбулентності, які описуються кінетичною енергією турбулентності (k) та її швидкістю дисипації (ε).

Випаровування (вихід летких)

Закон випаровування (або виділення летких речовин) починає діяти щодо горючої частинки тоді, коли її температура досягає температури випаровування, і цей процес триває доти, доки маса частинки не стане меншою або рівною масі нелетких речовин (тобто поки вся волога та леткі компоненти не вийдуть).

Передача тепла до частинки під час процесу виходу летких речовин включає в себе внески від конвекції та випромінювання

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_{\infty} - T_p) + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (0.9)$$

Рівняння, що описують теплообмін між частинкою та газовою фазою (які, ймовірно, позначені як рівняння (2.9) у контексті), за замовчуванням розв'язуються аналітично в програмному пакеті Ansys Fluent. Таке спрощення можливе, виходячи з припущення, що температура та маса частинки не зазнають суттєвих змін між послідовними дискретними кроками часу. Однак, Ansys Fluent також має можливість розв'язувати це рівняння у поєднанні з відповідним еквівалентним рівнянням масопередачі (наприклад, для швидкості випаровування або піролізу) [39].

Ця DPM-модель (Дискретна фазова модель), заснована на підході Ейлера-Лагранжа, є придатною для моделювання широкого спектра процесів, таких як розпилювальні сушарки, спалювання твердого та рідкого палива, а також деяких потоків, насичених частинками. Проте, вона має суттєві обмеження: вона непридатна для моделювання рідинно-рідинних сумішей, киплячих шарів або інших застосувань, де об'ємною часткою дисперсної фази не можна нехтувати ($\geq 10-15\%$ об'єму). Для подібних завдань, де взаємодія між частинками (P-P взаємодія) є критично важливою, можна додатково застосовувати моделі скінченних елементів (МСЕ) або моделі на основі підходу Ейлера-Ейлера.

Автори статті [35] використовують Метод скінченних елементів (МСЕ – Finite Element Method) для створення моделей фізичних явищ, що відбуваються з твердими частинками (наприклад, для моделювання рухомого шару палива). Комбінація Обчислювальної гідродинаміки (CFD) та МСЕ дає змогу моделювати рідинні системи, які містять тверді частинки, здатні рухатися та взаємодіяти з газом.

Для МСЕ характерним є застосування кусково-неперервних функцій, які описуються різними виразами на окремих ділянках розрахункової області [40, 41]. Особливість цього методу полягає в тому, що:

1. Розбиття області на підобласті (елементи), які мають порівняно просту форму.
2. Використання базисних функцій, які є однотипними для цих елементів.

При встановленні елементів скінченних розмірів, рівняння, що описують поведінку середовища, застосовуються, але розміри елементів завжди залишаються кінцевими. У результаті цього процесу інтегрування замінюється кінцевим підсумовуванням, а диференціальні рівняння в частинних похідних замінюються системами алгебраїчних або звичайних диференціальних рівнянь. Таким чином, суцільне середовище, яке має нескінченне число ступенів свободи, ефективно замінюється дискретною моделлю з кінцевим числом ступенів свободи, що робить задачу розв'язною чисельно.

2.1.2 Чисельний розрахунок утворення забруднюючих речовин за допомогою CFD-моделі в Ansys Fluent

Оксиди азоту (NO_x), що складаються переважно з монооксиду азоту (NO) та меншою мірою з діоксиду азоту (NO_2) й оксиду азоту (N_2O), є одними з найбільш шкідливих забруднювачів атмосфери. Ці викиди є головною причиною утворення фотохімічного смогу, сприяють виникненню кислотних дощів і завдають шкоди озоновому шару [Екологічний Вплив NO_x].

Програмне забезпечення Ansys Fluent надає потужні інструменти для визначення джерел утворення NO_x та допомагає у розробці ефективних заходів для контролю цих шкідливих викидів. Модель NO_x у пакеті Ansys Fluent дозволяє моделювати всі основні механізми утворення оксидів азоту:

1. Термічний NO_x (Thermal NO_x): виникає внаслідок окислення атмосферного азоту (N_2), присутнього в повітрі для горіння, при високих температурах.
2. Швидкий NO_x (Prompt NO_x): утворюється через високошвидкісні реакції на фронті полум'я за участю вуглеводневих радикалів.
3. Паливний NO_x (Fuel NO_x): формується шляхом окислення азоту, який вже міститься у складі самого палива (що є особливо актуальним для біомаси).
4. N_2O Шлях: при підвищеному тиску та збагаченні киснем NO_x може також утворюватися з молекулярного азоту (N_2) через проміжний оксид азоту (N_2O).

На противагу цьому, Ansys Fluent також моделює процеси їхнього споживання (зниження), зокрема через повторне спалювання (re-burning) та селективне некаталітичне відновлення (SNCR). Re-burning сприяє зниженню NO_x завдяки реакції NO з вуглеводнями, а SNCR — завдяки реакції NO з аміаком (NH_3). У цьому програмному забезпеченні використовуються моделі, розроблені на кафедрі палива та енергетики Університету Лідса у Великій Британії [39].

Для прогнозування викидів NO_x спеціалізоване програмне забезпечення розв'язує рівняння переносу концентрації NO . Якщо у паливі присутні джерела NO_x (азот палива), також необхідно розв'язувати додаткові рівняння переносу для

проміжних речовин (таких як ціаністий водень (HCN) та/або аміак (NH₃)), які є прекурсорами паливного NO_x.

Критична залежність від точності моделювання горіння: Рівняння переносу NO_x розв'язуються після моделювання горіння, ґрунтуючись на вже розрахованих полях потоку, температури та складу суміші. Таким чином, точне розв'язання моделі горіння є абсолютно необхідною передумовою для точного прогнозування NO_x. Наприклад, термічне утворення NO_x зростає дуже чутливо, подвоюючись приблизно на кожні 90 К підвищення температури, коли температура полум'я сягає близько 2200 К. Це вимагає надзвичайної обережності при заданні точних теплофізичних даних та вхідних даних граничних умов для моделі горіння.

Основні рівняння для переносу NO_x: Програмне забезпечення Ansys Fluent розв'язує рівняння масового переносу для сполук NO (та прекурсорів), враховуючи їхню конвекцію (перенесення потоком), дифузію (перенесення за рахунок різниці концентрацій), утворення та споживання (хімічні реакції). Цей підхід є абсолютно універсальним, оскільки він випливає з фундаментального принципу збереження маси. Вплив часу перебування на механізми утворення оксидів азоту включається через умови конвекції у керівних рівняннях, які записані в системі відліку Ейлера. Для моделювання термічного і швидкого механізмів NO_x часто достатньо лише рівняння транспорту речовини NO:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho D Y_{NO}) + S_{NO} \quad (0.10)$$

де Y_{NO} – масова частка NO у газовій фазі;

D – ефективний коефіцієнт дифузії;

S_{NO} – вираз, що враховує джерело утворення NO_x.

У ситуаціях, особливо актуальних при спалюванні біомаси, коли механізми паливних NO_x відіграють значнішу (або навіть домінуючу) роль порівняно з термічним NO_x, критично важливим стає відстеження проміжних частинок, що містять азот. З цієї причини, на додаток до рівняння переносу для основної сполуки

NO (яке було позначено як (2.10) у загальному вигляді), розв'язуються також додаткові рівняння переносу для прекурсорів (попередників NO_x), таких як ціаністий водень (HCN), аміак (NH_3) або оксид азоту (N_2O). Ці рівняння мають аналогічну структуру до рівняння (2.10) і враховують конвекцію, дифузію та хімічні джерела/стоки.

Хоча азот (N_2) потрапляє в системи згоряння переважно як складова повітря для горіння, за певних сприятливих умов — а саме, підвищеного тиску та високого вмісту кисню — проміжний механізм N_2O може забезпечувати до 90% від загальної кількості утвореного NO_x . Однак, оскільки цей механізм є критично важливим головним чином для газових турбін, компресійних двигунів та систем, що працюють у безполум'яному режимі (розведене чи MILD-спалювання), він не розглядається в даній кваліфікаційній роботі. Таке виключення обґрунтоване тим, що дослідження сфокусоване на атмосферному спалюванні в типових побутових водогрійних котлах, де N_2O -шлях, як правило, відіграє другорядну роль порівняно з термічним та паливним NO_x .

2.2 Обчислювальний підхід, застосований до розробленої CFD-моделі

Програмне забезпечення Ansys Fluent надає два основні методи для чисельного розв'язання керівних рівнянь (розв'язувачі): розв'язувач на основі тиску (Pressure-Based Solver) та розв'язувач на основі густини (Density-Based Solver) [39]. Хоча підхід на основі тиску спочатку був розроблений для моделювання низькошвидкісних нестисливих потоків, а підхід на основі густини — переважно для високошвидкісних стисливих потоків, обидва ці методи були згодом розширені та переформульовані. Це дозволило їм ефективно працювати та розв'язувати задачі в набагато ширшому діапазоні умов потоку, ніж передбачалося спочатку.

В обох CFD-розв'язувачах поле швидкості розраховується на основі рівнянь імпульсу. Незалежно від обраного методу, Ansys Fluent розв'язує керівні інтегральні рівняння для збереження маси, імпульсу, а також для енергії та інших скалярних величин (таких як турбулентність і хімічні речовини). В обох випадках використовується універсальна методика, що ґрунтується на контрольному об'ємі (метод кінцевого об'єму), яка включає три основні етапи:

1. Дискретизація: Поділ розрахункової області на дискретні контрольні об'єми за допомогою обчислювальної сітки.

2. Інтегрування: Інтегрування керівних рівнянь щодо кожного контрольного об'єму для побудови алгебраїчних рівнянь для дискретних залежних змінних (наприклад, швидкості, тиск, температура).

3. Лінеаризація та Розв'язання: Утворення лінійних дискретизованих рівнянь та розв'язання отриманої системи лінійних рівнянь для узгодження оновлених значень залежних змінних.

Обидва обчислювальні методи застосовують подібний процес дискретизації, але вони різняться у підході, який використовується для лінеаризації та подальшого розв'язання отриманих дискретизованих рівнянь.

Розв'язувач на основі тиску використовує алгоритм, що належить до загального класу методів проекції [39]. У цьому методі обмеження збереження маси (або нерозривності) для поля швидкості досягається через розв'язання рівняння тиску. Рівняння тиску виводиться комбінуванням рівнянь нерозривності та рівнянь імпульсу таким чином, щоб поле швидкості, яке коригується тиском, задовольняло умові нерозривності. Оскільки керівні рівняння є нелінійними та взаємопов'язаними, процес розв'язування вимагає ітерацій: весь набір рівнянь розв'язується повторно доти, доки обчислювальний розв'язок не зійдеться.

Розв'язувач на основі тиску у CFD дає можливість розв'язувати задачу потоку як окремо (відокремлений/segregated), так і разом (пов'язаний/coupled). Пов'язаний алгоритм (Coupled) розв'язує рівняння імпульсу, тиску та неперервності одночасно і спільно.

Переваги пов'язаного підходу:

- Він забезпечує більш надійну та ефективну однофазну реалізацію для стаціонарних потоків, демонструючи кращу швидкість збіжності порівняно зі схемами розділених рішень (як-от SIMPLE), особливо у складних потоках.
- Цей алгоритм є необхідним для перехідних (нестационарних) потоків у випадках поганої якості сітки або при використанні великих кроків у часі.

Компроміс (Недолік):

- Хоча швидкість збіжності значно покращується, за це доводиться платити: вимоги до оперативної пам'яті (RAM) обчислювальної системи збільшуються у 1,5–2 рази порівняно з розділеним алгоритмом. Це відбувається тому, що під час розв'язання полів швидкості та тиску в пам'яті потрібно зберігати дискретну систему всіх рівнянь імпульсу і тиску разом, а не лише одне рівняння, як це відбувається у відокремленому підході.

Висновок до розділу 2

Другий розділ кваліфікаційної роботи містить ґрунтовний огляд основних принципів та особливостей CFD-моделювання (Обчислювальної гідродинаміки) горіння твердого біопалива. У ньому детально описано шлях перетворення твердого палива (пелет або брикетів) у процесі згоряння, який за своєю суттю є багатофазним процесом (взаємодія твердої та газової фаз) [42]. Для коректного врахування цієї багатофазності, у програмному пакеті ANSYS Fluent використовується Дискретна фазова модель (DPM – Discrete Phase Model). При цьому, розв'язання газової фази (гомогенного горіння летких речовин) забезпечується класичним CFD-моделюванням і охоплює всі реакції горіння та супутні хімічні реакції, що відбуваються у цій фазі під час моделювання роботи котлів.

Було детально розглянуто низку наукових робіт, що стосуються тривимірного моделювання котлоагрегатів і застосування моделей поведінки частинок палива в розрахунковій області. Зокрема, встановлено, що DPM в Ansys Fluent використовує метод Ейлера-Лагранжа для чисельного розрахунку багатофазних потоків. У цьому підході рідка/газова фаза розглядається як безперервне середовище (за Ейлером) через розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса [42], тоді як дисперсна фаза (частинки) розв'язується шляхом відстеження траєкторії великої кількості цих окремих елементів (за Лагранжем) у розрахованому полі потоку.

Крім рівнянь руху частинок твердого біопалива та рівнянь обміну імпульсом, масою та енергією з газовою фазою (що описують сушіння, піроліз та горіння коксу), було визначено головне рівняння переносу NO_x для моделювання

термічного і швидкого механізмів його утворення. Це комплексне розуміння чисельних методів та фізико-хімічних моделей дозволяє обрати найбільш зручний метод обчислення (наприклад, пов'язаний алгоритм на основі тиску) та коректно виконати розрахунок згоряння біопалива і супутніх процесів у середовищі Ansys Fluent, що є основою для подальшого розділу роботи.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДОЛОГІЯ CFD АНАЛІЗУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ БІОПАЛИВА

3.1 Математичне представлення (опис) процесів, що відбуваються в котельному агрегаті

Дослідження процесу спалювання палива починається з обов'язкового етапу — створення точної тривимірної геометричної моделі паливоспалювальної установки. Об'єктом моделювання в даній роботі є твердопаливний водогрійний котел Alter українського виробництва, який має номінальну потужність 95 кВт та оснащений автоматичним пелетним пальником [43]. Оскільки процес горіння та теплообміну, який підлягає чисельному розрахунку, відбувається виключно всередині котлоагрегату, для моделювання нас цікавлять виключно внутрішні стінки котла (див. рис. 3.1), що формують робочий об'єм (камеру згоряння та канали димових газів).

Для створення детальної геометрії цієї тривимірної моделі серед інструментів програмного комплексу ANSYS Fluent було обрано інтегрований редактор DesignModeler. Цей інструмент розроблений на основі параметричних функцій, що дозволяє інтуїтивно й швидко створювати 2D-ескізи, моделювати 3D-деталі або завантажувати готові CAD-моделі для подальшої попередньої обробки. Його використання є ключовим для підготовки складної геометрії котла (включаючи теплообмінник та канали) перед інженерним аналізом та накладанням обчислювальної сітки.

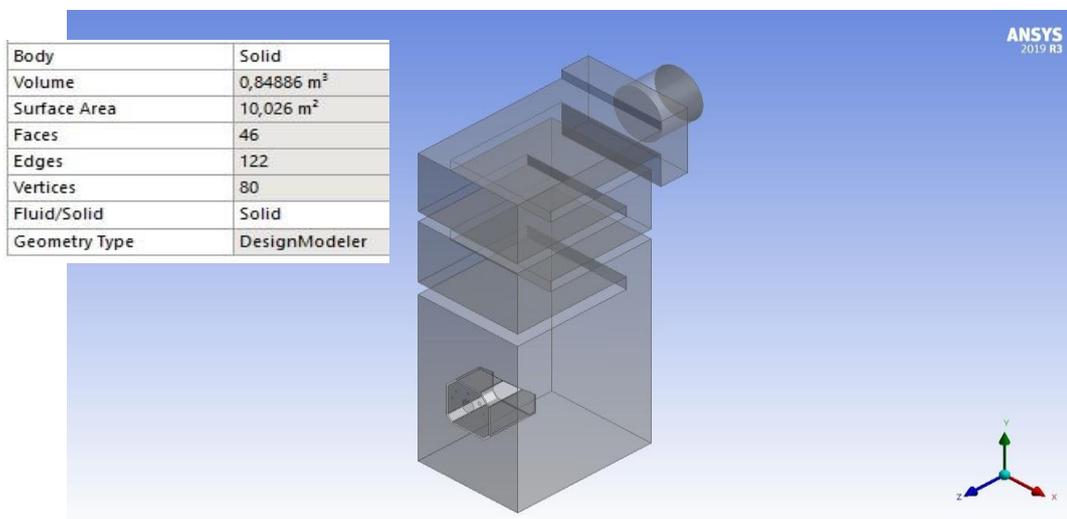


Рисунок 3.1 – Геометрія тривимірної моделі водогрійного котла Alter

Об'єктом чисельного дослідження є пелетний котел українського виробництва Alter з автоматичним факельним пальником, який має значну теплову потужність 95 кВт [43]. Така потужність дозволяє ефективно забезпечувати тепловою енергією житлові, комунальні або комерційні об'єкти площею до 950 м² (за умови стандартної висоти стель). Котел є високоавтоматизованим, оснащений бункером для пелет та механізмом автоматичної подачі палива, завдяки чому він може функціонувати як у повністю автоматичному, так і в ручному режимі завантаження. Габаритні розміри обраної моделі становлять 820 × 1990 × 1140 мм (ширина × висота × глибина).

Ключовою конструктивною особливістю котла є наявність чотириходового теплообмінника, розташованого безпосередньо над топковою камерою. Конфігурація теплообмінника являє собою низку горизонтально розташованих водяних полиць (водяних кишень). Виробник заявляє, що така багатоходова конфігурація дозволяє максимально використати теплову енергію продуктів згоряння до їх виходу в димохід, підвищуючи загальний термічний коефіцієнт корисної дії (ККД).

Після завершення створення тривимірної моделі внутрішніх поверхонь котла (робочої області) наступним критичним кроком є задання розмірів скінченних елементів, які формують розрахункову сітку (див. рис. 3.2). Існує пряма залежність: чим менший розмір елемента, тим точнішим буде чисельний розрахунок, оскільки дискретизація стає більш детальною. Однак, водночас зростає навантаження на обчислювальну машину (збільшуються вимоги до RAM та часу розрахунку).

Для даної кваліфікаційної роботи було прийнято базовий розмір елементів 20 мм з подальшим поступовим згущенням сітки (Refinement) в тих областях, де прийнятий розмір елемента перевищує фактичний геометричний розмір частини котла (наприклад, біля стінок, у зоні патрубків, або навколо пальника). У результаті, загальна розрахункова сітка складається з 631,140 елементів переважно тетраедричної форми. Використання згущення сітки в зонах високих градієнтів (температури, швидкості, концентрації) є обов'язковим для забезпечення достовірності прогнозування NO_x та CO.

Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	20, mm
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (40, mm)
Smoothing	Medium
Inflation Option	Smooth Transition
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
<input type="checkbox"/> Nodes	119675
<input type="checkbox"/> Elements	631140

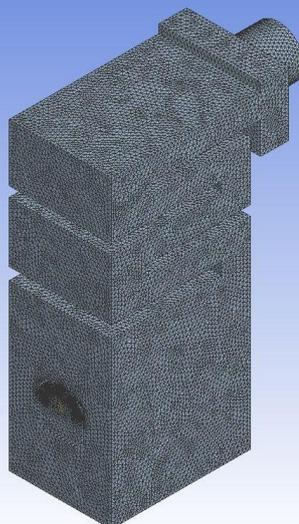
ANSYS
2019 R3

Рисунок 3.2 – Розрахункова сітка моделі котлоагрегату

Окрім використання елементів певних розмірів, таких як тетраедри, для дискретизації обчислювальної області, тетрадральну сітку можна також ефективно перетворити на поліедральну (або багатогранну) [38]. У цьому випадку, замість трикутників на площині або тетраедрів у просторі, створюються опуклі багатокутники або, відповідно, поліедрадри (див. рис. 3.3 [Посилання на Рис. 3.3]). Кожна поліедральна комірka, як правило, замінює кілька тетрадральних комірок, що призводить до значного зменшення загальної кількості обчислювальних елементів у сітці.

Ключові переваги цього підходу:

- **Точність:** Цей підхід дає змогу провести розрахунок горіння палива з достатньо високою точністю, оскільки кожна поліедральна комірka має більшу кількість сусідів, що покращує зв'язок між ними та градієнти.
- **Обчислювальна Ефективність:** Головна перевага полягає в тому, що поліедральна сітка забезпечує менше навантаження на обчислювальну техніку. Це досягається завдяки тому, що для даної кількості комірок поліедральні сітки мають меншу кількість граней порівняно з тетрадральними сітками, що суттєво зменшує вимоги до оперативної пам'яті (RAM) та час, необхідний для розв'язання дискретизованих рівнянь.

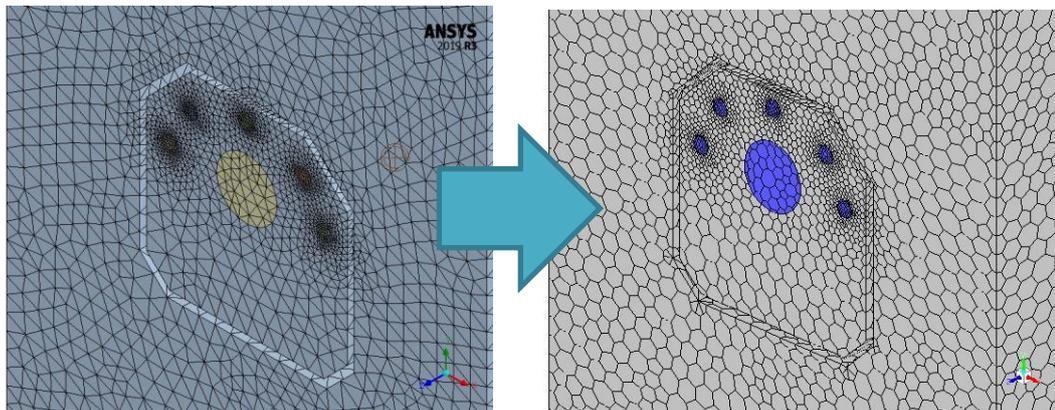


Рисунок 3.3 – Розрахункова сітка типу «тетраедр» (ліворуч)
і «полігедр» (праворуч)

Паливо, у даному випадку стандартизовані пелети (тверде біопаливо), транспортується від бункера, розташованого поруч із котлом, до автоматичного пальника за допомогою шнекового (гвинтового) механізму. Цей шнек забезпечує контрольовану та безперервну подачу палива, необхідну для підтримки заданої теплової потужності.

Ключовим елементом безпеки у цій конструкції є гнучкий гофрований рукав, що з'єднує шнек із пальником і виготовлений із легкоплавкого матеріалу. Така конструктивна особливість слугує ефективним запобіжним механізмом: у разі виникнення зворотної тяги або займання палива всередині рукава (наприклад, через іскру), цей рукав швидко перегорає (плавиться), утворюючи розрив у лінії подачі. Це, своєю чергою, миттєво припиняє надходження палива в топку, що ефективно виключає ризик виникнення пожежі та інших аварійних ситуацій у бункері та системі подачі.

Самі пелети спалюються у вогнетривкому пальнику, оснащеному рухомим колосником із жароміцної сталі. Рух колосника забезпечує рівномірне горіння та просування палива, а зола, що утворюється після згорання, автоматично зсипається через край колосника у висувний зольник.

Після успішного створення адекватної та верифікованої тривимірної геометричної моделі та розрахункової сітки (про що йшлося у попередніх розділах), можна переходити до наступного ключового етапу дослідження: задання фізичних моделей та граничних умов. Цей етап є вирішальним, оскільки дозволить

ініціювати чисельне моделювання та отримати достовірні результати процесу згоряння біопалива (зокрема, профілі температури, швидкість потоку, концентрації CO та NO_x) у середовищі CFD.

3.2 Характеристики біопалива, необхідні для інженерних (чисельних) розрахунків

Попередні етапи роботи, які включали створення точної геометричної моделі та обчислювальної сітки, були абсолютно необхідними для коректного задання процесу горіння палива не у відкритому середовищі, а у чітко визначеній та обмеженій розрахунковій області — внутрішньому об'ємі топки котла. Таке точне визначення граничних умов є критичним для достовірного CFD-моделювання.

У цій кваліфікаційній роботі для порівняльного аналізу розглядаються чотири різні типи пелет, які представляють як традиційну, так і аграрну біомасу:

1. Пелети з тріски ялини: є еталонним зразком, оскільки походять від відходів деревообробної промисловості (лісової сировини).
2. Пелети з пшеничної соломи: представляють аграрні залишки.
3. Пелети з лушпиння соняшнику: інший поширений вид сільськогосподарських залишків.
4. Пелети із суміші сільськогосподарських відходів: спеціально підготовлена суміш, яка має такий склад: 60% обрізків виноградника, 20% кукурудзяної соломи та 20% ячмінної соломи (детальні хімічні та фізичні характеристики див. табл. 3.1).

Вибір саме цих чотирьох видів палива дозволяє провести комплексний порівняльний аналіз їхніх екологічних (викиди NO_x та CO) та енергетичних показників (ККД) в умовах одного й того ж котлоагрегату.

Таблиця 3.1. Робочі характеристики біопалива

Параметр	Пелети з тріски ялини [8]	Пелети з пшеничної соломи [10]	Пелети з лушпиння соняшнику [12]	Пелети з суміші с/г відходів [13]
C^p	48,08%	41,60%	45,50%	42,28%
H^p	5,70%	4,90%	6,50%	5,06%
O^p	38,96%	36,20%	35,70%	37,01%
N^p	0,21%	0,37%	0,90%	0,55%
S^p	0,04%	0,059%	0,10%	0,09%
W^p	6,82%	9,10%	9,10%	9,00%
A^p	0,19%	7,77%	2,20%	6,01%
V^p	78,60%	67,50%	71,10%	72,30%
Q_{DH} кДж/кг	17380	15200	15990	15400

Хімічний склад і теплотворні характеристики обраних чотирьох видів пелет були детально проаналізовані відповідними авторами у дослідженнях [8], [10], [12] та [13] аналіз палива. Ці конкретні види пелет були обрані для дослідження, оскільки сировина для їхнього виготовлення широко поширена на території України (відходи деревообробки, лушпиння соняшника, пшенична та кукурудзяна солома, виноградна лоза), що підкреслює актуальність та практичне значення роботи для енергетичної безпеки та економіки країни.

Оскільки у цьому дослідженні вивчається горіння твердого палива (пелет), де піролізні гази та повітря змішуються лише у самій камері, застосовується модель горіння без попереднього змішування (Non-Premixed Combustion) (рис. 3.4). При цьому типі спалювання паливо (леткі гази піролізу) та окислювач (повітря) надходять у зону реакції окремими потоками і змішуються вже в об'ємі топки, утворюючи дифузійне полум'я.

Ключові переваги використання моделі Non-Premixed Combustion:

1. Спрощення Розрахунку: Моделювання значно спрощує розрахунок, вимагаючи розв'язання рівнянь переносу лише для одного або двох збережених скалярів (наприклад, частки суміші ξ та, можливо, ентальпії).

2. Табличний Підхід: Замість того, щоб розв'язувати рівняння для концентрації кожної окремої хімічної речовини (що є обчислювально дорогим), концентрації усіх речовин виводяться з прогнозованих полів фракцій суміші (ξ). Всі необхідні термохімічні розрахунки (рівноважні концентрації, температури) виконуються попередньо (офлайн) для різних значень ξ , а потім зводяться в таблицю (PDF Table) для швидкого використання в Ansys Fluent.

3. Взаємодія Турбулентності та Хімії (TCI): Взаємодія турбулентності та хімії враховується за допомогою функції щільності ймовірності (PDF – Probability Density Function).

PDF-Підхід: Залежності між фракцією суміші (ξ) та фракціями окремих речовин, а також густиною і температурою, описуються за припущення про хімічну рівновагу (або часткову рівновагу). Прогнозування турбулентного реактивного потоку вимагає передбачення усереднених значень цих флуктуаційних скалярів. Зв'язок між цими усередненими та миттєвими значеннями залежить від обраної моделі TCI. У Ansys Fluent використовується підхід функції щільності ймовірності (PDF) з передбачуваною формою як модель завершення (closure model), коли застосовується модель горіння без попереднього змішування. Це дозволяє врахувати ефект флуктуацій концентрації в турбулентному потоці.

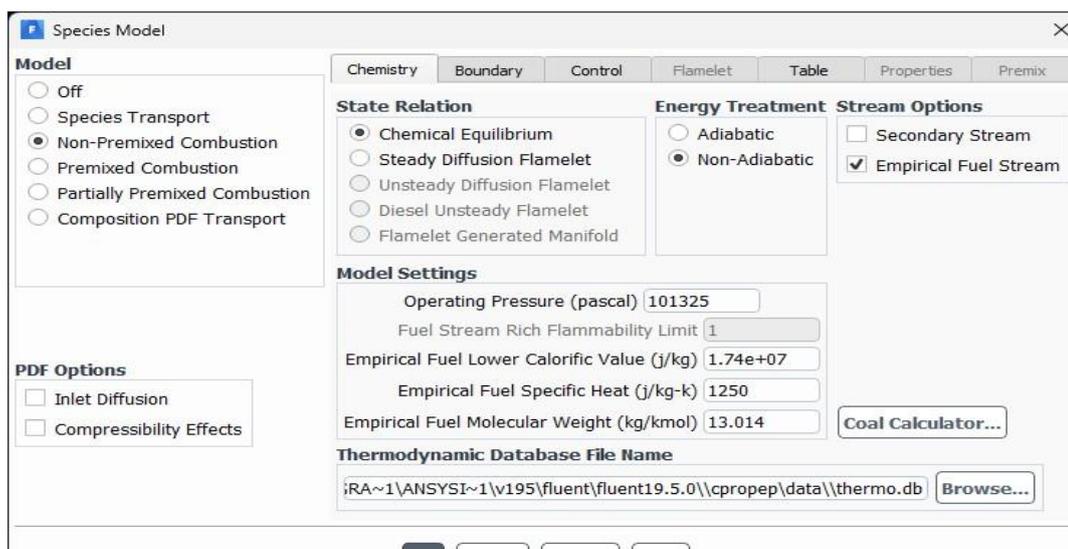


Рисунок 3.4 – Діалогове вікно Species model з обраною моделлю горіння

Для автоматизації обчислень і точного встановлення необхідних вхідних параметрів для моделей речовин, Дискретної фазової моделі (DPM) та моделей забруднювачів, пов'язаних зі спалюванням твердих палив, у програмі Ansys Fluent використовується спеціальне діалогове вікно «Вугільний калькулятор» (Coal Calculator) (див. рис. 3.5).

Цей інструмент вимагає стандартизованого введення даних:

1. Технічний (Proximate) Аналіз: Параметри технічного аналізу палива (вміст вологи, летких речовин, золи та коксу) вводяться відносно його робочої маси (as-received basis).

2. Повний (Ultimate) Аналіз: Параметри повного (елементного) аналізу необхідно вводити як частки елементів (C,H,O,N,S) відносно сухої знезоленої маси (DAF – dry-ash-free).

Оскільки елементний склад нашого біопалива відомий (отриманий з експериментальних даних), існує можливість перерахувати його робочий склад у показники сухої знезоленої або, що більш практично для моделювання, горючої маси (тобто без золи та вологи). Саме елементний склад на горючу масу біопалива, представлений у таблиці 3.2, буде використовуватися як основний розрахунковий параметр у даній кваліфікаційній роботі, забезпечуючи коректну ініціалізацію хімічних реакцій та термодинамічних розрахунків у моделі горіння.

Рисунок 3.5 – Діалогове вікно Coal calculator з введеними вхідними параметрами для пелет з тріски ялини

Таблиця 3.2. Характеристики біопалива віднесені на горючу масу

Параметр	Пелети з тріски ялини [8]	Пелети з пшеничної соломи [10]	Пелети з лушпиння соняшнику [12]	Пелети з суміші с/г відходів ¹⁾ [13]
C	51,70%	50,04%	51,30%	49,75%
H	6,13%	5,89%	7,33%	5,96%
O	41,90%	43,55%	40,25%	43,55%
N	0,23	0,45%	1,01%	0,64%
S	0,04%	0,07%	0,11%	0,10%
V^{daf}	84,53%	81,20%	80,15%	85,70%
Q_c^H , кДж/кг	18690	18285	18030	18120

¹⁾60% обрізки виноградника; 20% кукурудзяна солома; 20% ячмінна солома.

Окрім хімічного (елементного) складу палива, для запуску чисельного CFD-моделювання необхідно точно задати низку ключових вхідних і вихідних граничних умов та операційних параметрів граничні умови CFD. До цих параметрів належать: витрата палива й окисника, початкова температура обох потоків, величина (розмір) частинок палива (пелет) та обраний механізм утворення оксидів азоту (NO_x).

Як окисник для процесу горіння використовується повітря, причому його типовий склад (для розрахунку) задається стандартними об'ємними частками: 0,23 для кисню (O_2) та 0,77 для азоту (N_2) (тобто розрахункова маса 23% O_2 та 77% N_2 відповідно).

Вхідні граничні умови для моделі задаються через тип "масовий потік" (Mass Flow Inlet) як для палива, що надходить у пальник (або шар), так і для повітря, що подається в топку. Детальні числові значення цих параметрів, що відповідають номінальному тепловому навантаженню котла, представлені у таблиці 3.3.

Вихідні граничні умови (на виході з котла/димоходу) задаються через манометричний тиск (Gauge Pressure), який встановлено на нулі (0 Па). Це

налаштування означає, що абсолютний тиск на виході дорівнює тиску робочих умов (тобто 1 атм або 101325 Па). Таким чином, моделюється вільний вихід димових газів в атмосферу.

Таблиця 3.3. Граничні умови на вході

Параметр	Пелети з тріски ялини [8]	Пелети з пшеничної соломи [10]	Пелети з лушпиння соняшнику [12]	Пелети з суміші с/г відходів ¹⁾ [13]
Паливо: -витрата, кг/с	0,006354	0,007266	0,006906	0,007171
-температура, °C	27	27	27	27
-турбулентна інтенсивність, %	5	5	5	5
-гідрравлічний діаметр, мм	76	76	76	76
Повітря: -витрата, кг/с	0,040207	0,038855	0,044608	0,039135
-температура, °C	27	27	27	27
-турбулентна інтенсивність, %	10	10	10	10
-гідрравлічний діаметр, мм	19	19	19	19

¹⁾60% обрізки виноградника; 20% кукурудзяна солома; 20% ячмінна солома.

Витрата палива й окисника, що детально зазначена у таблиці 3.3, була отримана розрахунковим шляхом на основі паспортних теплотехнічних даних котла (номінального ККД, нижчої теплоти згоряння палива). Ці розрахунки були проведені з єдиною метою — забезпечити номінальну теплову потужність 95 кВт та гарантувати нагрів води в контурі котла у стандартному робочому діапазоні температур: від 58°C до 85°C. Це гарантує, що CFD-моделювання відображає реальний режим експлуатації.

Важливою особливістю даного чисельного аналізу є те, що задача моделювання розв'язується в стаціонарній постановці ($\partial/\partial t = 0$). Це означає, що

розглядається повністю усталений, рівноважний стан горіння, що значно знижує обчислювальне навантаження порівняно з нестационарним (перехідним) аналізом.

Після встановлення всіх необхідних початкових і кінцевих граничних умов (витрата палива, витрата повітря, тиск на виході, температурні умови), починається розрахунок процесу горіння біопалива в межах CFD-моделі котла. При цьому перші десять ітерацій слугують як стартові кроки (Initialization), які ініціалізують поля потоку та температури, що дозволяє уникнути чисельної нестабільності перед початком основного ітераційного циклу для досягнення збіжності.

Висновок до розділу 3

Третій розділ кваліфікаційної роботи присвячений початковому та підготовчому етапу чисельного дослідження процесу горіння біопалива. У цьому розділі було виконано низку критичних кроків, необхідних для створення достовірної CFD-моделі:

1. Створення Геометрії: Створено тривимірну модель внутрішніх стінок котлоагрегату (робочої області) за допомогою редактора геометрії DesignModeler у програмному комплексі Ansys.

2. Генерація Сітки: На основі цієї моделі згенеровано розрахункову сітку (обчислювальне поле) з фіксованим базовим розміром скінченних елементів, які були поступово згущені (refined) у зонах, що вимагають деталізації (наприклад, біля стінок та в зоні пальника).

3. Визначення Палива: Отримані розрахункові характеристики обраних чотирьох видів біопалив (пелети з тріски ялини, пшеничної соломи, лушпиння соняшнику та суміші аграрних відходів) для запису вхідних параметрів у Ansys Fluent. Номенклатура палив була обрана з сировини, широко розповсюдженої на території України, що підтверджує практичну актуальність дослідження.

4. Визначення Витрат: На основі паспортних даних котла було визначено та задано номінальну масову витрату палива індивідуально для кожного досліджуваного виду пелет, забезпечуючи номінальну теплову потужність 95 кВт.

Для досягнення вищої точності в обробці параметрів, задіяних у розрахунку горіння твердого палива, була обрана модель без попереднього змішування (Non-

Premixed Combustion). Цей підхід передбачає, що паливо (леткі гази піролізу) й окислювач (повітря) вводяться в розрахункову область окремими потоками та змішуються в об'ємі топки, що є фізично коректним для факельного пальника.

У моделі використовується припущення про хімічну рівновагу в неадіабатичній системі, що дозволяє описати залежності між фракцією суміші (ξ) та фракціями окремих речовин, а також врахувати теплообмін з навколишнім середовищем для точного визначення теплового потоку від горіння. У Ansys Fluent всі термохімічні розрахунки виконуються попередньо (офлайн) і зводяться у таблицю функції щільності ймовірності (PDF-таблицю). Ця PDF-таблиця необхідна для врахування взаємодії турбулентності та хімії у потоці. Крім того, ця PDF-таблиця також використовується для визначення орієнтовної температури займання всіх частинок палива, що є ключовим параметром для задання введення палива як дискретної фази (DPM).

Коефіцієнт надлишку повітря (α) для горіння було обрано рівним 1,2 (тобто 20% надлишок повітря), виходячи з міркувань забезпечення ефективного спалювання (CO догорання) та найбільш придатних умов експлуатації обладнання (зменшення викидів сажі та CO).

РОЗДІЛ 4. ДАНІ, ОТРИМАНІ В ХОДІ CFD МОДЕЛЮВАННЯ СПАЛЮВАННЯ БІОЛОГІЧНОГО ПАЛИВА.

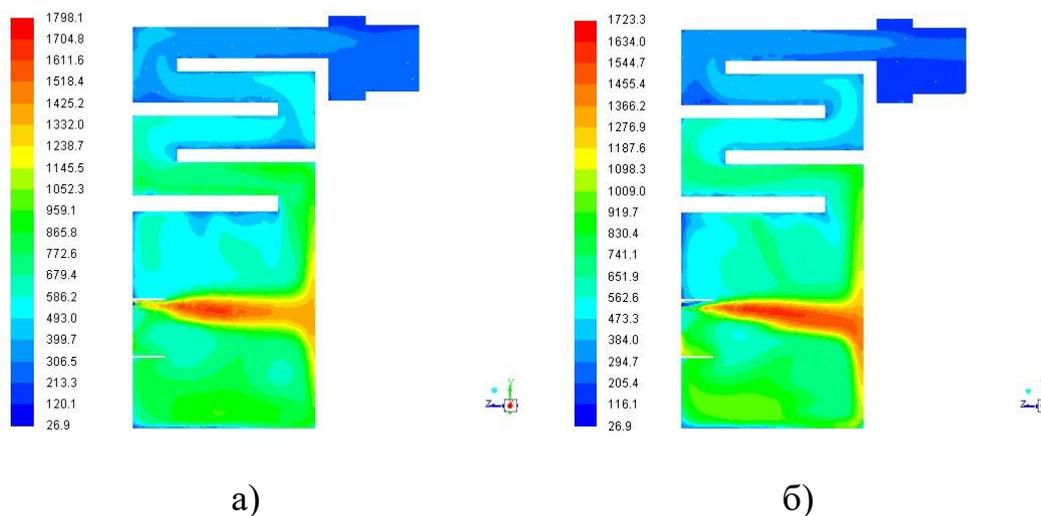
4.1 Дані розрахунку згоряння біопалива у котельному агрегаті

Після успішного проведення чисельного розрахунку згоряння чотирьох різних видів пелет у тривимірній CFD-моделі котла були отримані ключові величини та поля розподілу всередині котлоагрегату. Ці результати дозволяють всебічно оцінити як екологічну ефективність, так і теплотехнічні характеристики досліджуваних видів біопалива.

Основними величинами, що були зафіксовані та проаналізовані, є:

- Рівні викидів: Концентрації оксидів азоту (NO_x) та оксиду вуглецю (CO) у продуктах згоряння.
- Теплові характеристики: Розподіл температури в різних зонах топки та теплообмінника.
- Гідродинаміка та Згоряння: Розподіл фракції суміші та швидкості потоку у поздовжньому осьовому перетині котлоагрегату.

Для візуального та кількісного порівняння отриманих даних, поля температур, концентрацій оксидів азоту (NO_x) та оксиду вуглецю (CO) детально представлені на рисунках 4.1, 4.2, 4.4 і 4.5 відповідно. Ці візуалізації CFD є необхідними для ідентифікації зон інтенсивного горіння, локальних температурних піків (які є джерелом NO_x) та областей неповного згоряння (висока концентрація CO), що слугуватиме основою для формулювання практичних рекомендацій щодо оптимізації конструкції пального.



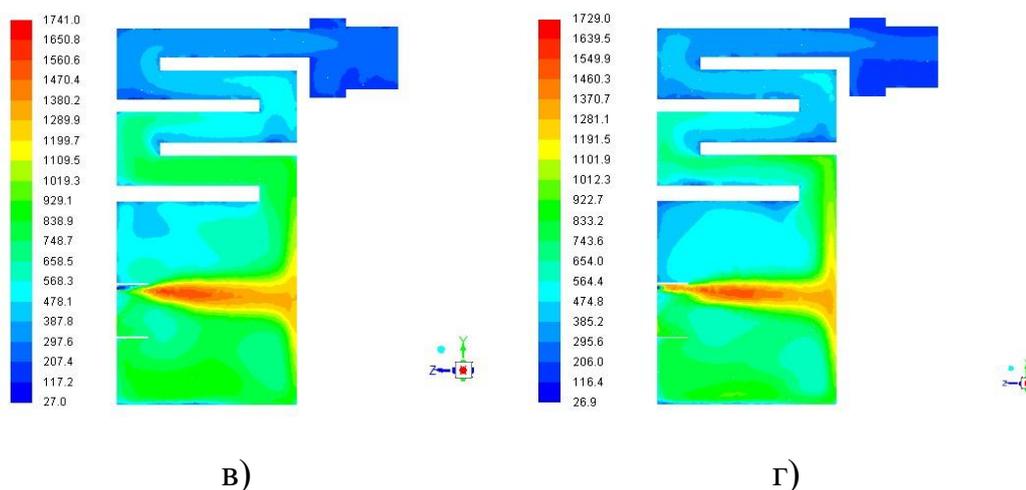


Рисунок 4.1 – Загальна температура ($^{\circ}\text{C}$) в центральному перетині котла при $\alpha=1,2$ під час спалювання пелет:

- а) з тріски ялини, б) з пшеничної соломи, в) з лущиння соняшнику,
г) з суміші с/г відходів

Аналіз температурних полів (рис. 4.1), отриманих у результаті CFD-моделювання, дозволяє чітко простежити динаміку та механізм розповсюдження продуктів спалювання всередині котлоагрегату. Зокрема, інтенсивне "обсмаження" (термічне навантаження) стінки, яка розташована безпосередньо навпроти факельного пальника, є очікуваним фізичним явищем. Саме для запобігання термічному руйнуванню металевих частин і мінімізації теплових втрат у навколишнє середовище, конструкція обладнання в цій високотемпературній зоні передбачає футерування (вогнетривку обшивку).

Загальна картина розподілу температури виявилася якісно однаковою для всіх чотирьох досліджуваних видів пелет, що свідчить про домінуючий вплив геометрії котла та режиму горіння. Профілі температури демонструють інтенсивне зростання високих температур у зоні факелу, а також подальший ефективний розподіл тепла по камері спалювання та, що є ключовим для ефективності, у чотирьохходовому теплообміннику. В останньому відбувається активне сприйняття тепла від димових газів теплоносієм (водою), що забезпечує високий термічний ККД котла.

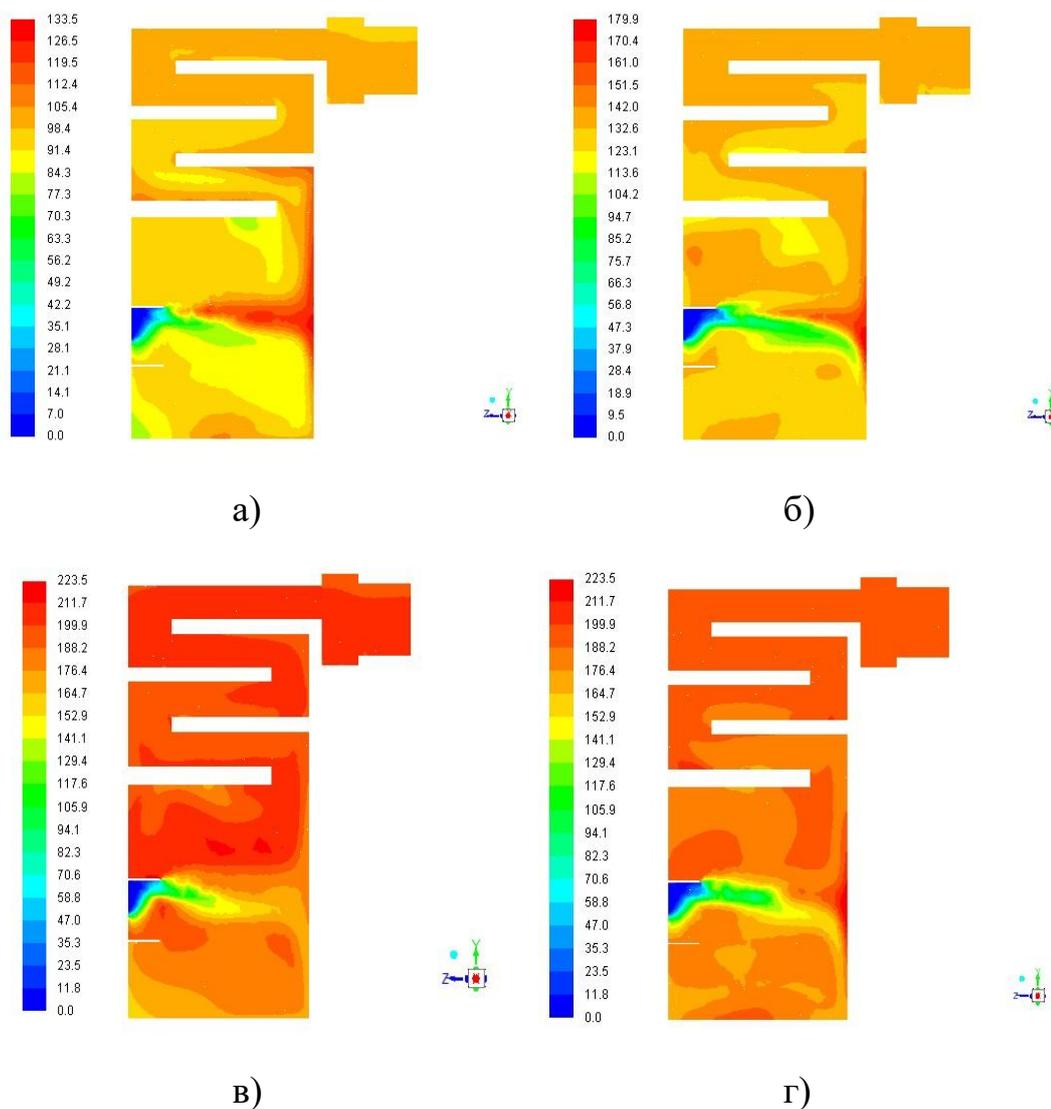


Рисунок 4.2 – Концентрація NO_x (ppm) в центральному перетині котла при $\alpha=1,2$ під час спалювання пелет:

- а) з тріски ялини, б) з пшеничної соломи, в) з лушпиння соняшнику,
г) з суміші с/г відходів

Розподіл концентрації оксидів азоту (NO_x) у центральному перетині котла, візуалізований на рисунку 4.2, є прямим результатом складної кінетики процесу горіння та подальшої гідродинамічної поведінки продуктів згорання. Коли факел горіння прямо зіштовхується зі стінкою котла, розташованою навпроти пальника, високошвидкісний потік газів розбивається, що призводить до утворення великих завихрень (рециркуляційних зон) у топці. Саме у цих завихреннях, де час перебування газів вищий, і накопичуються оксиди азоту. Важливо, що висока локальна концентрація NO_x у цих зонах викликана, головним чином,

уповільненням руху газів (збільшенням часу перебування) та підтримкою високої температури. Після цього NO_x поступово підхоплюється загальним потоком і прямує до конвективної частини котла, причому його концентрація на виході з котла практично не змінюється порівняно з піковими значеннями у факелі, що свідчить про відсутність ефективного механізму відновлення NO_x у цій конфігурації.

Аналіз екологічних показників виявив суттєву залежність викидів NO_x від хімічного складу палива (рис. 4.3):

- Найнижчий рівень викидів NO_x продемонстрували пелети з тріски ялини (лісова біомаса), що становив лише 99 ppm (часток на мільйон). Це пояснюється низьким вмістом азоту у деревній сировині.
- Натомість, пелети на основі лушпиння соняшнику мали найвищі показники, досягаючи 210 ppm. Цей результат є типовим для агропелет і пояснюється значно вищим вмістом азоту у лушпинні, який перетворюється на паливний NO_x під час горіння.
- Викиди NO_x від пелет з пшеничної соломи та суміші сільськогосподарських відходів становили 154 ppm і 195 ppm відповідно.

Ці дані наочно підтверджують, що агропелети, як правило, мають більший екологічний слід щодо NO_x , ніж деревні пелети, що вимагає застосування додаткових технологій зниження викидів або оптимізації горіння при їх використанні.

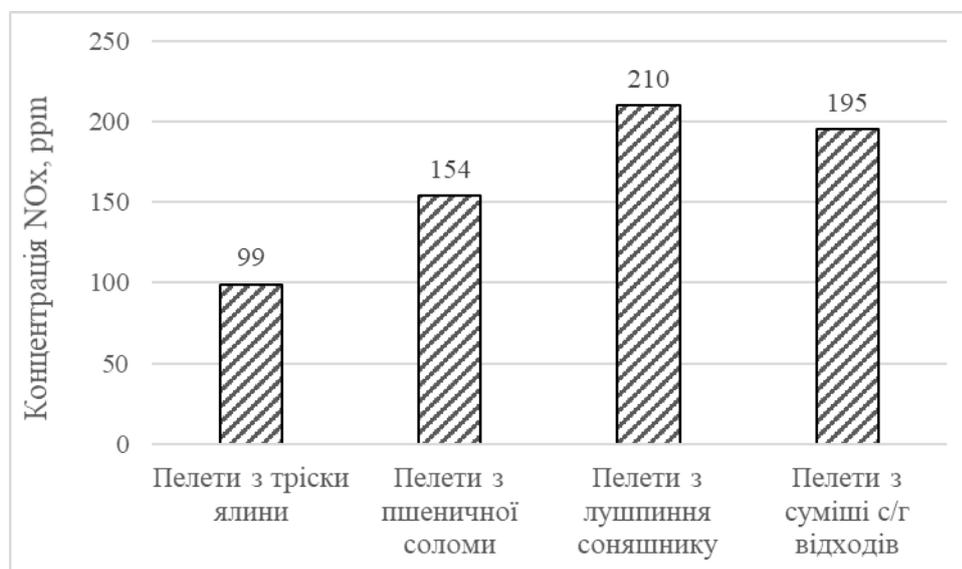


Рисунок 4.3 – Концентрація NO_x (ppm) у відхідних газах

при $\alpha=1,2$ під час спалювання чотирьох видів пелет у водогрійному котлі

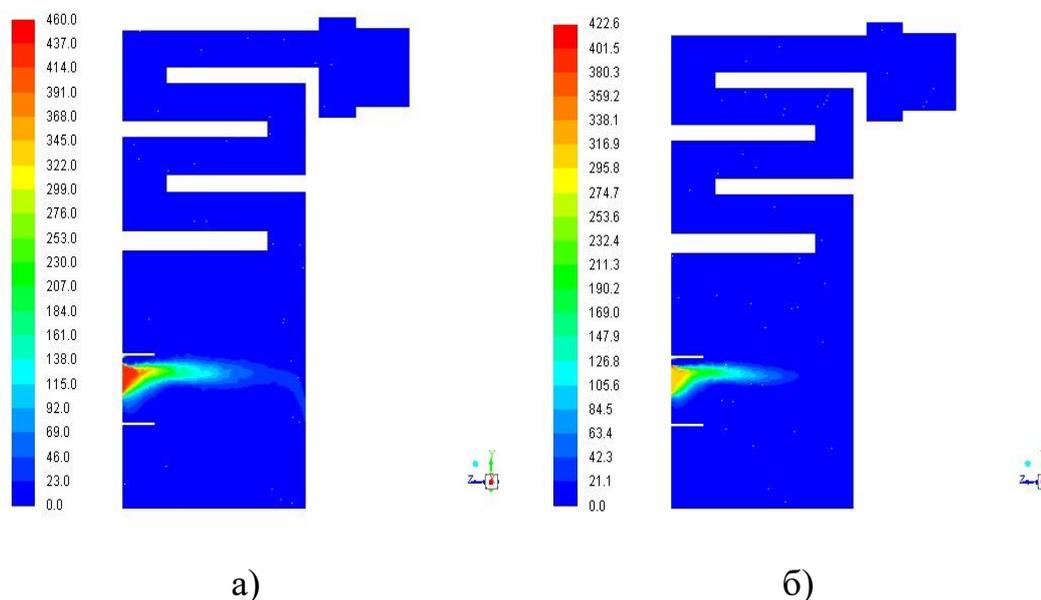
Окрім оксидів азоту (NO_x) та, звісно, діоксиду вуглецю (CO_2), у результаті розрахунку горіння пелет було також отримано важливий розподіл монооксиду вуглецю (CO) (рис. 4.4).

Помітна концентрація CO в області пальника свідчить про неповне згоряння палива (формування проміжного продукту окислення), яке спричинене декількома факторами, пов'язаними з конструктивними особливостями пальника та аеродинамікою паливо-повітряної суміші:

1. Геометрія Пальника: Пальник не оснащений турбулізаторами (або елементами, що генерують інтенсивне перемішування), що призводить до недостатнього змішування летких газів піролізу та повітря в початковій фазі горіння.

2. Режим Подачі Палива: Пелети розміром 6 мм (стандартний діаметр) подаються перпендикулярно до граничної поверхні (колосника).

Наявність CO у цій зоні відображає поступовий процес окислення вуглецю. Замість миттєвого повного окислення до CO_2 , вуглець спочатку окислюється до CO , а потім CO має доокислитися до CO_2 у зоні достатньої кількості кисню та високої температури. Високі локальні значення CO вказують на те, що кінетика окислення CO до CO_2 є недостатньо швидкою у початковій зоні горіння, що вимагає оптимізації подачі вторинного повітря та, можливо, модифікації конструкції пальника для поліпшення турбулентного змішування.



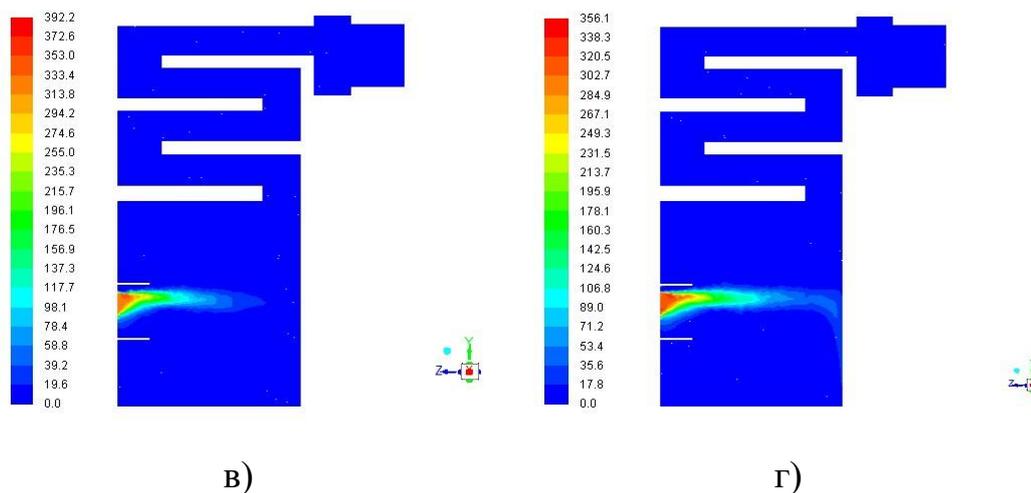


Рисунок 4.4 – Концентрація CO (г/м³) в центральному перетині котла при $\alpha=1,2$ під час спалювання пелет:

- а) з тріски ялини, б) з пшеничної соломи, в) з лушпиння соняшнику,
г) з суміші с/г відходів

Найбільш активне згорання летких речовин із подальшим їхнім первинним перетворенням на монооксид вуглецю (CO) відбувається у зоні полум'я та каналу пальника. Це візуально відображено червоною областю на рисунку 4.4.

Ключовий термохімічний взаємозв'язок: Порівняння цього розподілу CO з температурними полями на рисунку 4.1 чітко показує, що зони високої інтенсивності доокиснення CO до CO₂ відповідають зонам, де температура перевищує 600°C (температурний поріг для швидкого окислення CO). Всередині факелу, за умови достатньої кількості кисню та високих температур, концентрація CO поступово знижується, оскільки інтенсивно відбувається реакція його окиснення до CO₂.

Під час спалювання пелет, як і будь-якого іншого вуглецевмісного палива, відбувається утворення значної кількості вуглекислого газу (CO₂). За умови високих температур та достатнього надходження повітря, паливо повністю окислюється, перетворюючись на двоокис вуглецю. Як видно на рисунку 4.5, вміст CO₂ у продуктах згорання зростає (насамперед у зоні активного горіння CO), оскільки CO₂ є кінцевим, найбільш стабільним продуктом повного окислення вуглецю. Розподіл CO₂ зазвичай корелює з областю максимального тепловиділення.

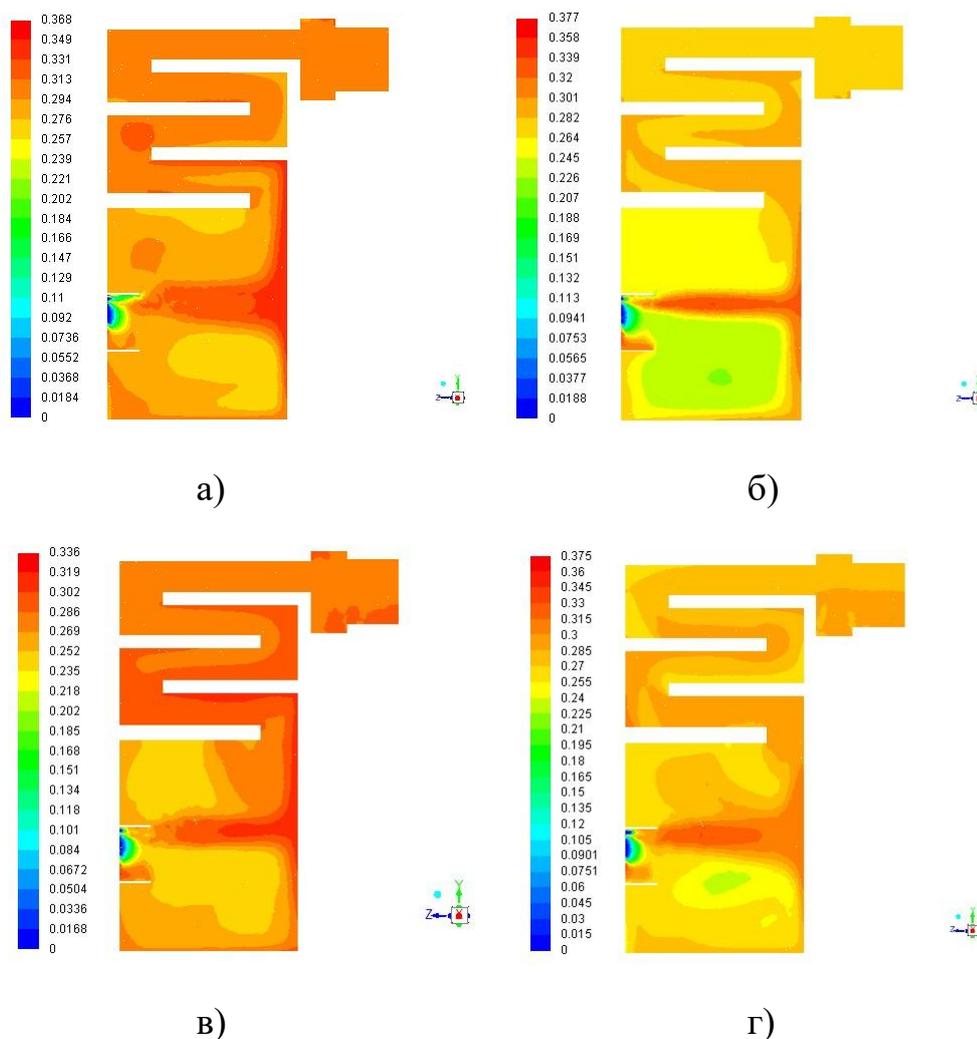


Рисунок 4.5 – Концентрація CO_2 ($\text{кг}/\text{м}^3$) в центральному перетині котла при $\alpha=1,2$ під час спалювання пелет:

- а) з тріски ялини, б) з пшеничної соломи, в) з лушпиння соняшнику,
г) з суміші с/г відходів

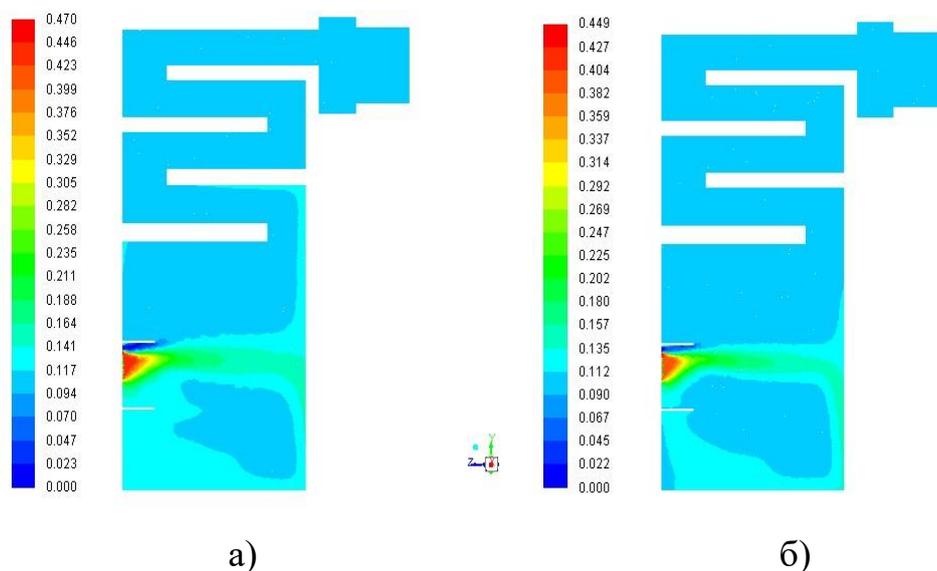
Аналіз результатів чисельного моделювання горіння чотирьох різних видів пелет дозволив визначити точні кількісні показники утворення вуглекислого газу (CO_2) у продуктах згорання. Ці показники є важливими для оцінки повного згорання та вуглецевого сліду палива:

- Найвища концентрація CO_2 була зафіксована при спалюванні пелет із суміші сільськогосподарських відходів, де вона склала $0,249 \text{ кг}/\text{м}^3$, що відповідає 19% об'єму димових газів. Це свідчить про високу ефективність конверсії вуглецю цього складного палива.

- Для деревних пелет (тріска ялини) концентрація CO_2 становила 246 г/м^3 (або $0,246 \text{ кг/м}^3$), що дорівнює $18,8\%$ об'єму.
- Для пелет із пшеничної соломи показник був дещо нижчим — 240 г/м^3 (або $0,240 \text{ кг/м}^3$), що відповідає $18,4\%$ об'єму.
- Найменша концентрація CO_2 була виявлена у пелет із лущиння соняшнику — $0,22 \text{ кг/м}^3$, що становить 17% об'єму димових газів. Цей нижчий показник може бути пов'язаний як із меншою часткою вуглецю в горючій масі, так і з можливістю більшої кількості незгорілих речовин (наприклад, підвищеною концентрацією CO або сажі).

Всі ці показники, які перебувають у діапазоні 17% – 19% об'єму, в цілому свідчать про високий ступінь повноти згорання у моделі котла, оскільки досягнуті концентрації близькі до теоретично можливих.

Для візуального аналізу процесу змішування палива та окисника, на рисунку 4.6 додатково візуалізовано розподіл середньої частки суміші по поздовжньому осьовому перетину котлоагрегату, що є ключовим параметром для моделі Non-Premixed Combustion.



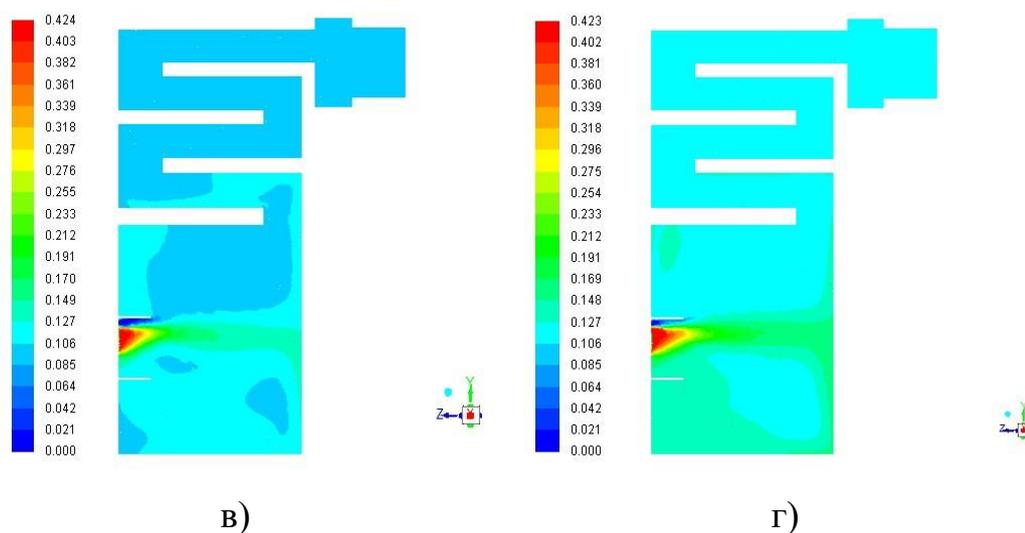


Рисунок 4.6 – Розподіл параметру Mean Mixture Fraction у центральному перетині котла при $\alpha=1,2$ під час спалювання чотирьох видів пелет

Середня частка суміші (Mean Mixture Fraction, ξ) являє собою масову частку потоку, яка складається з палива та окисника [43]. У моделі горіння без попереднього змішування (Non-Premixed Combustion) ця частка є ключовим збереженим скаляром і вона визначає межі та локації, де вуглець та леткі речовини, вивільнені з твердої фази, переходять у газоподібну фазу для взаємодії з киснем.

Отримані в результаті чисельного моделювання показники процесу горіння біопалива у котлі (зокрема, високі локальні концентрації CO та NO_x, а також температурні поля) вказують на недосконалість проходження термохімічних перетворень палива та суттєві недопали. З огляду на це, критично необхідно провести кількісну оцінку ефективності роботи котла при використанні досліджуваних видів пелет. Така оцінка має включати не лише екологічні показники (викиди NO_x та CO), але й розрахунок термічного коефіцієнта корисної дії (ККД), що дозволить визначити, який саме вид біопалива є найбільш економічно та енергетично вигідним для експлуатації в даному котлоагрегаті.

4.2 Встановлення ККД котла для режиму роботи з досліджуваним видом біопалива (пелетами)

Ефективність використання палива в будь-якому котлоагрегаті (тепловій установці) залежить від двох ключових та взаємопов'язаних чинників: повноти процесу спалювання палива (якість хімічної реакції) та глибини охолодження продуктів згоряння (якість теплообміну).

Частина теплової енергії, яка не передається поверхням нагріву і, відповідно, робочому тілу (теплоносію, наприклад, воді), вважається втраченою для системи. Ці втрати (або теплові невідповідності) класифікуються за кількома основними шляхами:

- Втрати з відхідними газами (q_2): Тепло, що виноситься димовими газами в атмосферу.
- Втрати внаслідок хімічної неповноти згоряння (q_3): Енергія, що залишається в недогорілих газах (переважно CO).
- Втрати внаслідок механічної неповноти згоряння (q_4): Енергія, що залишається у твердих недопалах (вуглець у золі та шлаку).
- Втрати через огороження котла (q_5): Теплові втрати в навколишнє середовище через стінки котла (випромінювання та конвекція).
- Втрати з теплою шлаку та золи (q_6): Тепло, що виноситься гарячими твердими відходами.

Зважаючи на вищезазначені класифіковані втрати теплоти, коефіцієнт корисної дії (ККД) водогрійного котла при спалюванні деревних та агропелет розраховується за оберненою (непрямою) методикою [44]. Цей підхід є стандартним у теплотехніці і базується на визначенні та підсумовуванні всіх теплових втрат.

Формула для розрахунку ККД за оберненим тепловим балансом:

$$\eta_k^{br} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \quad (0.11)$$

де q_2 – теплота, яка втрачається з відхідними газами, %;

q_3 – теплота, яка втрачається від хімічної неповноти згорання, %;

q_4 – теплота, яка втрачається від механічної неповноти згорання, %;

q_5 – теплота, яка втрачається у навколишнє середовище, %;

q_6 – теплота, яка втрачається зі шлаком і золою, %;

Втрата теплоти котельним агрегатом з відхідними газами :

$$q_2 = (I_{\text{відх}} - a \cdot I_{\text{х.п.}}) \frac{100 - q_4}{Q_p^H} \quad (0.12)$$

де $I_{\text{відх}}$ – ентальпія вихідних газів, кДж/кг;

$I_{\text{х.п.}}$ – ентальпія холодного повітря, кДж/кг;

Витрата теплоти від хімічної неповноти згорання:

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_p^H} \cdot 100 \quad (0.13)$$

де Q_3 – теплота продуктів неповного згорання у димових газах, кДж/кг.

Втрата теплоти від хімічної неповноти згорання може бути визначена згідно з [45], якщо відомо склад продуктів згорання:

$$q_3 = (126,4 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358,2 \cdot CH_4) \frac{V_{\text{с.г.}}(100 - q_4)}{Q_p^H} \quad (0.14)$$

де CO, H₂, CH₄ – вміст продуктів неповного згорання у димових газах, %;

$V_{\text{с.г.}}$ – питомий об'єм сухих димових газів, м³/кг.

Втрата теплоти від механічної неповноти згорання:

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_p^H} \cdot 100 \quad (0.15)$$

де Q_4 – теплота продуктів неповного згорання у шлаку та провалу, кДж/кг.

Втрати теплоти з незгорілим вуглецем (q_4) фактично є втратами, спричиненими незгорілими частинками коксу (твердого залишку після виділення летких речовин), які виносяться із зони горіння разом із топковими газами. Коли ці частинки коксу перебувають у високотемпературній зоні полум'я протягом занадто короткого часу (тобто недостатній час перебування), вони лише встигають виділити леткі речовини, але залишаються частково незгорілими (недопал).

За умови нормальної експлуатації, як передбачено у кваліфікаційній роботі, тепловтрати з незгорілим вуглецем (q_4) для твердого палива варіюються у типовому діапазоні від 0,5% до 5% від загальної енергії палива. При цьому менші значення цих втрат характерні для палива з високим виходом летких речовин, оскільки в таких випадках більша частина енергії вивільняється у газовій фазі. Також зазначається, що втрати теплоти з провалом (паливо, що не згоріло і провалилося через решітку) у сучасних котлах становлять до 1%.

Втрата теплоти у навколишнє середовище через стінки котла (q_5) залежить безпосередньо від якості його теплоізоляції та умов теплообміну з повітрям у котельні. Точне вимірювання цієї втрати є досить складним завданням без спеціалізованого обладнання, особливо якщо ці дані не вказані у паспортних характеристиках обладнання, тому часто використовуються довідкові дані.

Для сучасних сталевих котлів малої потужності (як у даному дослідженні) такі втрати, як правило, становлять до 1%. Згідно з джерелом [45], втрату теплоти через огороження котла (q_5) можна розрахувати, якщо відомі такі параметри: загальна площа поверхні стінок і високотемпературних елементів котла, коефіцієнти тепловіддачі (як конвекцією, так і випромінюванням), а також середні температури поверхонь котла та навколишнього середовища.

Втрати з теплою шлаку і золи (q_6) є наступним типом втрат, які необхідно врахувати:

$$q_6 = \frac{a_{шл}(c\vartheta)_{зл}A^P}{Q_p^H} \quad (0.16)$$

де $a_{шл}$ – доля шлаку;

$(c\vartheta)_{зл}$ – ентальпія шлаку і золи, кДж/кг.

Крім того, для перевірки результатів було виконано розрахунок ККД котла за прямим балансом, а також проведено обчислення за запропонованою формулою [46]:

$$\eta_{\Gamma} = 100 - qA \quad (0.17)$$

де η_{Γ} – ефективність горіння палива у котлі, %;

qA – втрати теплоти у димову трубу, %, які розраховують так:

$$qA = (t_{\text{відх}} - t_{\text{х.п.}}) \cdot \left(\frac{A_1}{CO_2} + B \right) \quad (0.18)$$

де $t_{\text{відх}}$ – температура відхідних газів, °С;

$t_{\text{х.п.}}$ – температура холодного повітря, °С;

CO_2 – вміст оксиду вуглецю у димових газах, %;

A_1, B – коефіцієнти Зігерта, характерні для певного палива (Додаток Б).

Оскільки коефіцієнти A_1 і B у формулі (4.7) є типовими та емпірично встановленими для деревних пелет [47], ця формула в першу чергу оптимально підходить для оцінки ефективності горіння при спалюванні саме пелет з тріски ялини.

Однак, для цілей комплексного порівняльного аналізу у кваліфікаційній роботі, цю формулу було також застосовано до інших досліджуваних агропелет (пелет із соломи та лущиння). Це зроблено для отримання базового індикативного значення ККД, незважаючи на структурні відмінності у складі палива.

Критичне обмеження запропонованої у джерелі [46] формули полягає в тому, що вона базується на спрощеному припущенні: єдиний фактор, який суттєво знижує ефективність згоряння, — це втрати через димову трубу (втрати з відхідними газами, q_2). Розраховане таким чином значення ефективності не можна вважати повністю точним, оскільки воно не враховує критичні втрати, спричинені неповним згорянням палива (хімічний недопал, q_3 , та механічний недопал, q_4) [47].

У контексті реального спалювання біомаси, особливо агропелет з високим вмістом золи, ігнорування цих втрат може призвести до переоцінки фактичного термічного ККД.

$$IL = \frac{\alpha \cdot CO}{CO + CO_2} \quad (0.19)$$

де IL – втрата теплоти від неповного згорання, %;

α – характеристичний коефіцієнт для певного палива (Додаток Б).

Тоді остаточний ККД паливоспалюючої установки приймає такий вигляд:

$$\eta_G^* = \eta_G - IL \quad (0.20)$$

На основі рівнянь (4.1), (4.7) і (4.10) (які, ймовірно, описують баланс енергії, спрощений ККД та обернений тепловий баланс відповідно) було проведено розрахунок орієнтовних значень ефективності роботи котла для всіх чотирьох досліджуваних видів пелет (деревних та аграрних). Ці результати, що дають змогу критично порівняти різні методи оцінки, візуалізовано на діаграмі (рисунок 4.7) і розділені на три групи:

- **Стовпець I: Ефективність CFD-Моделювання.** Цей стовпець відображає теплову ефективність котла, отриману безпосередньо за допомогою Ansys Fluent (тобто розраховану чисельно на основі енергетичного балансу CFD-моделі).
- **Стовпець II: ККД за Загальноприйнятою Методикою (η):** Цей стовпець показує коефіцієнт корисної дії (ККД), розрахований за загальноприйнятою та стандартизованою оберненою методикою [44], яка враховує всі основні теплові втрати (з відхідними газами, хімічний/механічний недопал, втрати через огороження, тощо).
- **Стовпець III: ККД за Спрощеною Методикою:** Цей стовпець представляє ККД, розрахований за запропонованою літературною методикою [46]

з урахуванням формули (4.9). Ця методика є спрощеною, оскільки вона зазвичай ігнорує втрати, спричинені неповним згорянням палива (СО та кокс), фокусуючись лише на втратах через димові гази.

Критичне порівняння цих трьох груп результатів дозволяє не лише визначити фактичну ефективність кожного виду палива, а й валідувати CFD-модель (порівнюючи Стівпець I зі Стівпцем II), а також оцінити похибку, яку дає спрощений розрахунок (порівнюючи Стівпець II зі Стівпцем III).

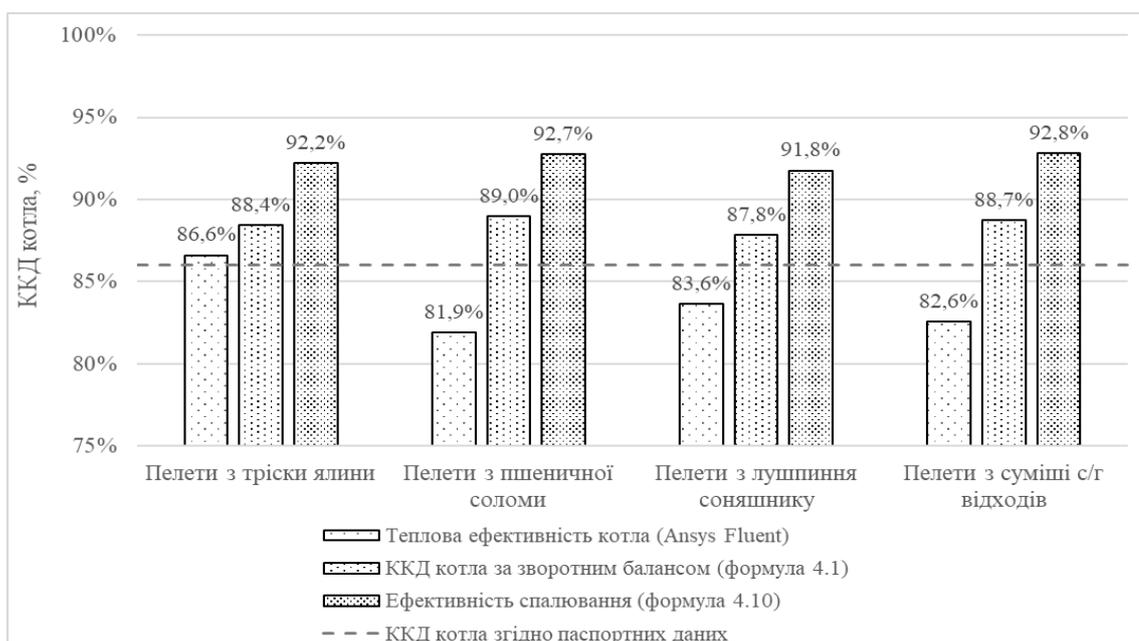


Рисунок 4.7 – ККД бруто котла при спалюванні чотирьох видів пелет

Навіть спрощена формула (4.7), незважаючи на її обмеження (ігнорування хімічного та механічного недопалу), досить точно відображає загальну тенденцію зміни ефективності. Тобто, вона дозволяє швидко визначити, чи зростає, чи знижується ефективність котельної установки як паливоспалюючого обладнання при зміні режиму або палива.

Значення ККД, представлені на діаграмі (рис. 4.7), відображають ККД бруто ($\eta_{\text{бруто}}$). Це означає, що при їх розрахунку не були враховані витрати електроенергії на роботу допоміжного обладнання (так звані внутрішні витрати на власні потреби). До цих витрат належить електроенергія, споживана:

- Дутьовим вентилятором (подача повітря).

- Запальником (під час розпалу, до 800 Вт).
- Шнековим механізмом (подача палива).
- Водяним насосом системи опалення (циркуляційний насос робочого тіла).
- Крім того, не враховуються витрати на заготівлю палива (придбання, транспортування тощо).

Згідно з характеристиками котла, споживання електроенергії допоміжним обладнанням під час його експлуатації сягає 175 Вт, а під час розпалювання — до 800 Вт. Хоча ці витрати є незначними порівняно з циркуляційним насосом робочого тіла (який часто є зовнішнім), задача кваліфікаційної роботи сфокусована саме на ефективності використання палива (термічний ККД), а не на електричному споживанні. Тому основною метою є орієнтовне визначення ККД бруто котла під час згоряння пелет на номінальному навантаженні.

При цьому, у джерелі [10] представлена дещо спрощена методика визначення коефіцієнта корисної дії (ККД), порівняно з повним розрахунком за оберненим тепловим балансом (рівнянням 4.1). Ця спрощена методика, ймовірно, використовується як швидкий індикатор, але повинна бути доповнена більш точним CFD-аналізом та оберненим розрахунком для отримання достовірних результатів.

$$\eta_{comb} = 100 - q_a - q_b - q_r \quad (0.21)$$

де η_{comb} – ефективність спалювання, %;

q_a – втрати теплоти з димовими газами, %, які розраховуються так:

$$q_a = \frac{t_{vidx} - t_{x.n.}}{Q_p^H} \cdot \left(\frac{C_{c.g.} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} + \frac{C_{H_2O} \cdot 1,224 \cdot (9 \cdot H^P + W^P)}{100} \right) \cdot 100 \quad (0.22)$$

де $c_{c.g.}$ – питома теплоємність сухих димових газів, кДж/(кг·°С);

c_{H_2O} – питома теплоємність водяної пари, кДж/(кг·°С);

C_r – вміст вуглецю в залишковій золі, %.

q_b – втрати теплоти від хімічної неповноти згоряння, %, які розраховуються так:

$$q_b = \frac{12644 \cdot CO \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2) \cdot Q_p^H} \quad (0.23)$$

q_r – втрати теплоти від неспаленого вуглецю, %, які розраховуються так:

$$q_r = \frac{335 \cdot b \cdot R}{Q_p^H} \quad (0.24)$$

де b – горючі компоненти в матеріалі з провалом, %;

R – залишковий матеріал, %.

Вміст вуглецю в залишковій золі, що відноситься до кількості спаленого тестового палива (у % від маси) знаходиться за наступним рівнянням:

$$C_r = \frac{b \cdot R}{100} \quad (0.25)$$

Розрахунок представлених теплових втрат, описаних рівняннями (4.12–4.14), виконується відповідно до європейського стандарту EN 14785:2006 [48]. Цей стандарт забезпечує уніфікований та верифікований підхід до оцінки енергетичної ефективності опалювальних приладів.

Втрати теплоти, позначені як q_a , q_b і q_r у цьому стандарті, є аналогічними за своїм фізичним змістом раніше згаданим втратам q_2 (з відхідними газами), q_3 (хімічний недопал) і q_4 (механічний недопал). Однак, вони використовують інші розрахункові залежності та емпіричні коефіцієнти, які безпосередньо визначені європейським регламентом. Кінцеві результати розрахунку ККД котла за цією методикою, що забезпечує міжнародну порівнянність даних, зведено у таблицю.

Якщо взяти залежність ефективності спалювання від надлишку повітря (λ або α), яка була представлена в роботі [10], і продовжити лінію тренду (або тенденцію

зміни ефективності) у напрямку зменшення λ , то отримуємо вигляд, подібний до зображеного на рисунку 4.8. Цей графік зазвичай демонструє, що максимальний ККД досягається при оптимальному значенні λ (зазвичай $\approx 1,2-1,4$), після чого ККД знижується як при подальшому зростанні λ (через збільшення втрат з відхідними газами, q_2), так і при зменшенні λ (через зростання СО та хімічного недопалу, q_3). Аналіз цієї залежності є критичним для визначення найбільш економічного режиму роботи котла.

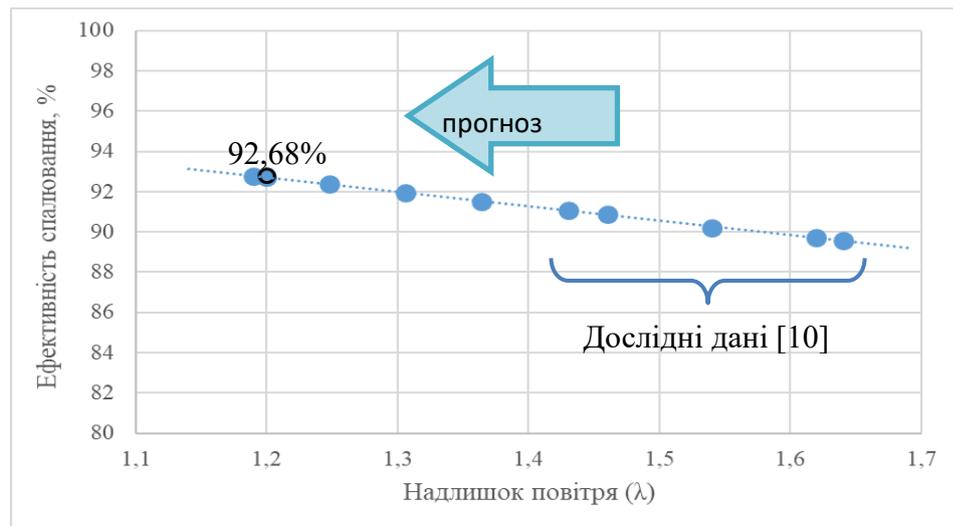


Рисунок 4.8 – Залежність ефективності спалювання від надлишку повітря під час згоряння пелет з деревини

Хоча наведена залежність ефективності від надлишку повітря (λ) (візуалізована, наприклад, на рисунку 4.8) була розроблена та емпірично встановлена для загального класу деревних пелет [10], її застосування є цілком виправданим для перевірки значення ефективності у нашому конкретному випадку — для пелет із тріски ялини.

Пелети з тріски ялини, як паливо, що походить із лісової сировини, за своїми фізико-хімічними характеристиками (низький вміст золи, високий вміст летких речовин, відносно низький вміст азоту) максимально відповідають параметрам, для яких була розроблена ця базова залежність. Таким чином, використання цієї залежності дозволяє отримати достовірну контрольну точку або валідний діапазон ККД, що є критично важливим для валідації чисельних результатів CFD-

моделювання та порівняння їх з оберненим розрахунком теплового балансу. Ця перевірка посилює надійність усіх отриманих у роботі даних.

Таблиця 4.1 – Ефективність спалювання деревних пелет

	Дослідні дані [10]					Прогнозні дані				
λ	1,64	1,62	1,54	1,46	1,43	1,364	1,306	1,248	1,2	1,19
η_{comb}	89,59	89,71	90,19	90,89	91,07	91,53	91,95	92,36	92,7	92,77

Результати розрахунку ефективності спалювання для першого досліджуваного палива в рамках кваліфікаційної роботи (отримані із застосуванням формули (4.11)) були піддані суворій валідації. Отримане значення, яке візуально відображене як виділена точка на діаграмі (рисунок 4.8) у контексті залежності ефективності від надлишку повітря, демонструє надзвичайно високий ступінь збіжності з показником, який був спрогнозований (табл. 4.1) на основі загальної тенденції зміни ефективності, отриманої з незалежних експериментальних даних роботи [10]. Ця близькість слугує потужним інструментом підтвердження адекватності обраної розрахункової методики. Зокрема, розрахована величина ефективності спалювання для пелет при робочому коефіцієнті надлишку повітря (λ) 1,2 становить 92,68%. При цьому, відносна похибка між цим розрахованим значенням та показником, спрогнозованим на основі експериментальної тенденції (робота [10]), є мінімальною, складаючи менше 1% — а саме, лише 0,03%. Така мінімальна розбіжність підтверджує точність та надійність як застосованої емпіричної формули, так і загальної моделі для оцінки ефективності використання деревних пелет у даному котлоагрегаті.

Висновок до розділу 4

Четвертий розділ кваліфікаційної роботи містить фінальні результати чисельного розрахунку горіння біопалива у водогрійному котлі та проводить комплексний порівняльний аналіз спалювання чотирьох різних видів пелет [Посилання на Вступ]. У цьому розділі було представлено: поля розподілу

температур продуктів згоряння, концентрацій шкідливих оксидів (NO_x , CO) та розподіл суміші у центральному перетині котла, розраховані при фіксованому коефіцієнті надлишку повітря $\lambda = 1,2$. Крім того, було визначено ефективність роботи котла на досліджуваних пелетах у номінальному режимі. Для валідації ККД котлоагрегату було розраховано трьома методами: за загальною стандартизованою методикою [44], за спрощеними формулами [46] та фактична теплова ефективність (прямий ККД) на основі даних теплопередачі, отриманих безпосередньо у Ansys Fluent.

Результати обчислювального моделювання горіння твердого біопалива, включаючи отримані показники емісії та орієнтовні значення ККД котла, вказують на недосконалість процесу теплохімічного перетворення. Про це свідчить як висока температура відхідних газів (що вказує на значні втрати тепла q_2), так і загальна теплова ефективність котлоагрегату. Основною причиною цього є недопал, який виникає переважно на перехідних режимах роботи (або у локальних зонах збіднення киснем). Незважаючи на достатнє загальне надходження повітря (вміст O_2 у відхідних газах становив $\approx 7\%$), недопал, ймовірно, спричинений критично коротким часом перебування палива у зоні горіння та нерівномірним змішуванням повітря і палива в топці (погана турбулізація). Додатковим важливим фактором є те, що пшенична солома, наприклад, має значно нижчу щільність, ніж деревина, через що її дрібні частинки захоплювалися повітрям майже одразу на вході в топку і не встигали повністю згоріти, посилюючи механічний недопал (q_4).

Важливо підкреслити, що проведені дослідження здійснювалися за відсутності будь-яких інтенсифікаторів горіння в пальнику або турбулізаторів у каналах димових газів. Встановлення перегородок або інших конструкцій, які здатні інтенсифікувати процес теплообміну між продуктами спалювання та поверхнями нагріву, є необхідним заходом, що передбачає можливість досягнення ефективнішого використання палива та кращого екологічного стану відхідних газів (зниження CO та оптимізація NO_x).

ВИСНОВКИ

На сучасному етапі розвитку людства, в умовах значного техногенного навантаження на довкілля, критично важливим є гармонійний розвиток економіки, енергетики та екології. Біомаса, що включає відходи деревини та аграрної промисловості, визнається відновлюваною та екологічно чистішою альтернативою викопному паливу, оскільки вона має менший вуглецевий слід та сприяє енергонезалежності держави. Запровадження нових технологій, заснованих на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ), та заходи щодо зменшення викидів NO_x та CO є ключовими цілями міжнародних програм і національних стратегій низьковуглецевого розвитку.

У кваліфікаційній роботі було виконано комплексне CFD-моделювання процесу горіння твердого біопалива (деревні та агропелети) у малопотужному котлоагрегаті Alter потужністю 95 кВт із використанням програмного забезпечення Ansys Fluent. Четвертий розділ містить поля розподілу температур, концентрацій NO_x та CO , а також порівняльний аналіз ККД котла, розрахованого трьома різними методиками.

Основні кількісні висновки та температури (при $\lambda = 1,2$):

Паливо (Пелети)	Пікова $T_{\text{факелу}}^{\circ\text{C}}$	$T_{\text{вихідних газів}}^{\circ\text{C}}$	Викиди NO_x (ppm сирих газів)
Тріска ялини (Деревні)	1798°	245°	99ppm
Лушпиння соняшнику	1741°	236°	210ppm
Пшенична солома	1723°	225.6°	154ppm

Дане дослідження проводилося за відсутності будь-яких інтенсифікаторів горіння або турбулізаторів, що обмежує ефективність. На основі отриманих результатів моделювання сформульовано такі рекомендації:

1. Покращення Конструкції та Зниження CO : Рекомендується встановлення інтенсифікаторів горіння (які забезпечують турбулізацію потоку

реагуючої суміші) та турбулізаторів у каналах димових газів (зокрема у чотириходовому теплообміннику). Це забезпечить краще змішування палива й окисника та збільшить час перебування частинок, що мінімізує недопал і підвищить теплову ефективність.

2. Оптимізація Роботи з Агропелетами (q_4): Оскільки пелети з низькою щільністю (наприклад, із соломи) схильні до швидкого виносу з топки, слід оптимізувати швидкість подачі первинного повітря. Це допоможе зменшити механічну неповноту згоряння (q_4) та збільшити час перебування частинок.

3. Контроль NO_x : Як первинний захід для зниження оксидів азоту, рекомендовано застосовувати ступеневу подачу повітря в камеру згоряння. Застосування повітряної завіси з використанням вторинного повітря також сприяє збільшенню часу перебування частинок та їхньому догорянню. Застосування вторинних заходів контролю NO_x , таких як селективне каталітичне відновлення (SCR), є доцільним у випадках використання агропелет (лушпиння соняшнику) через їхню високу емісію.

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

Здобувач вищої освіти _____ Ярослав ВИСОЧАНСЬКИЙ

СПИСОК ВИКОРИСТАНОХ ДЖЕРЕЛ

1. Вугілля в Україні - Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-1/part-2/section-7/7-7>.
2. Директива (ЄС) 2018/2001 Європейського Парламенту та Ради від 11 грудня 2018 року про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел. 2018. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC>.
3. Паризька угода. *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text.
4. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf.
5. Концепція реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 р.: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 07.12.2016 № 932-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/932-2016-p>.
6. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/file/text/58/f469391n10.pdf>.
7. Emissions of heating appliances fuelled with agropellet produced from vine pruning residues and environmental aspects / A. Pizzi та ін. *Renewable Energy*. 2018. Т. 121. С. 513–520. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.064>.
8. DEM/CFD modeling of the fuel conversion in a pellet stove / J. Wiese та ін. *Fuel Processing Technology*. 2016. Т. 152. С. 223–239. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.06.005>.
9. Ciupek B., Gołoś K. Concentration of Nitrogen Oxides when Burning Wood Pellets of Various Origins. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Т. 21, № 5. С. 229–233. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/123121>.
10. Horvat I., Dović D., Filipović P. Numerical and experimental methods in development of the novel biomass combustion system concept for wood and agro pellets. *Energy*. 2021. Т. 231. С. 120929. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120929>.

11. Influence of wood chip quality on emission behaviour in small-scale wood chip boilers / C. Schön та ін. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2017. Т. 9, № 1. С. 71–82. URL: <https://doi.org/10.1007/s13399-017-0249-7>.
12. Sirisomboon K., Charernporn P. Effects of air staging on emission characteristics in a conical fluidized-bed combustor firing with sunflower shells. *Journal of the Energy Institute*. 2017. Т. 90, № 2. С. 316–323. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.12.001>.
13. Experimental study on the ash behaviour in combustion of pelletized residual agricultural biomass / J. Royo та ін. *Fuel*. 2019. Т. 239. С. 991–1000. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.054>.
14. Evaluating the impact of wood sawdust and peanut shell mixing ratio on cocombustion performance / Y. Nie та ін. *Fuel*. 2022. Т. 324. С. 124667. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124667>.
15. Bioliquids and their use in power generation – A technology review / T. Seljak та ін. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Т. 129. С. 109930. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109930>.
16. Viornerly-Portillo E. A., Bravo-Díaz B., Mena-Cervantes V. Y. Life cycle assessment and emission analysis of waste cooking oil biodiesel blend and fossil diesel used in a power generator. *Fuel*. 2020. Т. 281. С. 118739. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118739>.
17. Alternative liquid fuel from pyrolysis of polyethylene wax / C. Chaiya та ін. *Energy Reports*. 2020. Т. 6. С. 1262–1267. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.045>.
18. Ultra-low emission combustion of diesel-coconut biodiesel fuels by a mixture temperature-controlled combustion mode / V. Józsa та ін. *Energy Conversion and Management*. 2020. Т. 214. С. 112908. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112908>.
19. Mixture Temperature-Controlled combustion of different biodiesels and conventional fuels / G. Hidegh та ін. *Energy*. 2021. Т. 234. С. 121219. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121219>.

20. A review on catalytic methane combustion at low temperatures: Catalysts, mechanisms, reaction conditions and reactor designs / L. He та ін. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. T. 119. C. 109589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109589>.
21. Syngas as a Reburning Fuel for Natural Gas Combustion / M. Wilk та ін. *Chemical and Process Engineering*. 2014. T. 35, № 2. C. 181–190. URL: <https://doi.org/10.2478/cpe-2014-0014>.
22. Szewczyk D., Ślęfarski R., Jankowski R. Analysis of the combustion process of syngas fuels containing high hydrocarbons and nitrogen compounds in Zonal Volumetric Combustion technology. *Energy*. 2017. T. 121. C. 716–725. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.040>.
23. Werle S. Modeling of the reburning process using sewage sludge-derived syngas. *Waste Management*. 2012. T. 32, № 4. C. 753–758. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.013>.
24. He D., Yan W. Influences of different diluents on NO emission characteristics of syngas opposed-flow flame. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. T. 43, № 5. C. 2570–2584. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.171>.
25. Mehregan M., Moghiman M. A numerical investigation of preheated diluted oxidizer influence on NO_x emission of biogas flameless combustion using Taguchi approach. *Fuel*. 2018. T. 227. C. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.049>.
26. Effects of inert dilution on the propagation and extinction of lean premixed syngas/air flames / Y. Zhang та ін. *Fuel*. 2015. T. 157. C. 115–121. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.007>.
27. Swirl stability and emission characteristics of CO-enriched syngas/air flame in a premixed swirl burner / N. A. Samiran та ін. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017. T. 112. C. 315–326. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.011>.
28. Experimental and numerical studies on the premixed syngas swirl flames in a model combustor / N. A. Samiran та ін. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. T. 44, № 44. C. 24126–24139. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.158>.

29. Numerical investigations of combustion and emissions of syngas as compared to methane in a 200MW package boiler / M. A. Habib та ін. *Energy Conversion and Management*. 2014. Т. 83. С. 296–305. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.056>.
30. Sahu A. B., Ravikrishna R. V. Quantitative LIF measurements and kinetics assessment of NO formation in H₂/CO syngas–air counterflow diffusion flames. *Combustion and Flame*. 2016. Т. 173. С. 208–228. URL: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.09.003>.
31. Park S., Kim Y. Effects of nitrogen dilution on the NO_x formation characteristics of CH₄/CO/H₂ syngas counterflow non-premixed flames. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Т. 42, № 16. С. 11945–11961. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.080>.
32. Effect of fuel injection velocity on MILD combustion of syngas in axially-staged combustor / M.-m. Huang та ін. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Т. 66, № 1-2. С. 485–492. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.033>.
33. Mardani A., Karimi Motaalegh Mahalegi H. Hydrogen enrichment of methane and syngas for MILD combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Т. 44, № 18. С. 9423–9437. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.072>.
34. Marangwanda G. T., Madyira D. M., Babarinde T. O. Combustion models for biomass: A review. *Energy Reports*. 2020. Т. 6. С. 664–672. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.135>.
35. Three-dimensional CFD simulation of a large-scale grate-fired biomass furnace / C. A. Bermúdez та ін. *Fuel Processing Technology*. 2020. Т. 198. С. 106219. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106219>.
36. Somwangthanaroj S., Fukuda S. CFD modeling of biomass grate combustion using a steady-state discrete particle model (DPM) approach. *Renewable Energy*. 2020. Т. 148. С. 363–373. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.042>.
37. CFD modelling of air staged combustion in a wood pellet boiler using the coupled modelling approach / T. Zdravec та ін. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020. Т. 20. С. 100715. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100715>.

38. Баранюк О.В., Сірий О.А., Веремійчук Г.М., Лисенко О.М. Моделювання горіння пелет у котлах потужністю до 25 кВт. Теплофізика та Теплоенергетика. 2022. Т. 44. №4. С. 89–98. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2022.11>
39. ANSYS Fluent Help. Documentation, tutorials, and videos for Ansys products. 2022. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/main_page.html?lang=en&hl=1.
40. Дубенець В.Г., Хільчевський В.В., Савченко О.В. Основи методу скінченних елементів: Навчальний посібник. – Чернігів: ЧДТУ, 2007. – 288 с.
41. Конспект лекцій з дисципліни "Методи аналізу, моделювання та оптимізації процесів ОМТ": Частина 3 «Теоретичні методи розрахунку процесів ОМТ» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня / Укл. С.В. Єршов. – Кам'янське, ДДТУ. – 2016. – 60 с.
42. Algazin S. D. Numerical study of Navier-Stokes equations. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2007. Т. 48, № 5. С. 656–663. URL: <https://doi.org/10.1007/s10808-007-0084-x>.
43. Твердопаливний котел Duo Uni Pellet - купити в Києві і Україні | Alter. *Alter - виробник твердопаливних котлів та опалювального обладнання*. URL: <https://alter.ua/catalog/kotel-duo-uni-pellet/p7>.
44. Сірий О.А. Еколого-теплотехнічні випробування котельного устаткування: метод. вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Котельні установки». – К. : НТУУ "КПІ", 2022. – 57 с.
45. Comparison of Emissions and Efficiency of Two Types of Burners When Burning Wood Pellets from Different Suppliers / G. Peřka та ін. *Energies*. 2023. Т. 16, № 4. С. 1695. URL: <https://doi.org/10.3390/en16041695>.
46. MADUR Electronics. Principles of Calculating Results by the Madur Gas Analysers. Available online: https://www.madur.com/data/download/00_common/manuals/Principles%20of%20calculating%20the%20results_EN.pdf.