

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра "Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент"

"Допущено до захисту"
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____ Петро ПЛЕШКОВ
" ____ " _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

**Розробка та аналіз рішень підвищення ефективності
використання відходів деревини для системи теплопостачання
деревообробного підприємства з біопаливною котельною**
**Development and analysis of solutions to improve the efficiency of
wood waste use for the heat supply system of a woodworking
enterprise with a biofuel boiler house**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕНМ-23М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Кузьма МОРОЗ
« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи
д.т.н., професор
_____ Василь КЛИМЕНКО
« ____ » _____ 2024 р.
Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«_____» _____ 2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Мороза Кузьми Олександровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Розробка та аналіз рішень підвищення ефективності
використання відходів деревини для системи теплопостачання

деревобробного підприємства з біопаливною котельною

Development and analysis of solutions to improve the efficiency of wood waste use
for the heat supply system of a woodworking enterprise with a biofuel boiler house

2. Керівник роботи (проекту) Клименко Василь Васильович, д.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 10.12.2024 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Метою цього дослідження є підвищення ефективності використання
відходів деревини для системи теплопостачання деревобробного
підприємства з біопаливною котельною. В рамках цього дослідження
будуть враховуватися особливості теплофізичні характеристики
біологічного палива та та процесів горіння в котлах з метою підвищення
надійності та ефективності роботи біопаливних котелень

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ.</i>	<i>10.10.24</i>	
2	<i>Сучасний стан досліджень у сфері енергетичного використання деревної біомаси</i>	<i>16.10.24</i>	
3	<i>Математичне моделювання процесів спалювання біологічної сировини</i>	<i>20.10.24</i>	
4	<i>Експериментальне визначення кінетичних параметрів термічної деструкції деревної біомаси</i>	<i>06.11.24</i>	
5	<i>Експериментальні дослідження ефективності спалювання подрібненої біомаси</i>	<i>15.11.24</i>	
6	<i>Охорона праці</i>	<i>20.11.24</i>	
7	<i>Висновки</i>	<i>22.11.24</i>	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки та презентації магістерської роботи</i>	<i>08.12.24</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2024 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Мороз К.О. Розробка та аналіз рішень підвищення ефективності використання відходів деревини для системи теплопостачання деревообробного підприємства з біопаливною котельною

Development and analysis of solutions to improve the efficiency of wood waste use for the heat supply system of a woodworking enterprise with a biofuel boiler house

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Енергетичний менеджмент». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м. Кропивницький, 2024 р.

Кваліфікаційна робота присвячена розвитку дослідження спалювання здрібненої деревної біомаси та удосконалення паливних пристроїв для підвищення ефективності цього процесу. В роботі було досліджено специфіку перебігу цього процесу з урахуванням та без урахування тепловідведення і визначити вимоги до ефективного спалювання деревної біомаси в паливних пристроях.

Завдяки застосуванню рівняння кінетики реакції горіння та методу найменших квадратів була розроблена система рівнянь для обчислення кінетичних констант реакції горіння деревини, використовуючи результати неізотермічного методу дослідження цього процесу.

Проведено експериментальні дослідження та визначено елементний склад різних видів деревини, зокрема швидкоростучих сортів. На основі термогравіметричного аналізу були визначені кінетичні константи реакції горіння для подрібненої деревини, а також отримані аналітичні залежності відносної втрати маси від оберненої температури, що дозволяє дослідити етапи процесу горіння та сформулювати вимоги до умов спалювання цієї

породи деревини в паливних пристроях. Окрім того, було визначено вплив коефіцієнта надлишку повітря на паливний режим при спалюванні генетично модифікованої деревини, що дає змогу обирати оптимальні значення режимних параметрів спалювання та зменшувати рівень викидів шкідливих речовин.

ТЕПЛОГЕНЕРАЦІЯ, ДЕРЕВНЕ ПАЛИВО, БІОПАЛИВНА КОТЕЛЬНЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

ABSTRACT

MOROZ K. Development and analysis of solutions to improve the efficiency of wood waste use for the heat supply system of a woodworking enterprise with a biofuel boiler house

Розробка та аналіз рішень підвищення ефективності використання відходів деревини для системи теплопостачання деревообробного підприємства з біопаливною котельною

Specialty 141 - "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - EPP " Energy Management ". - Central Ukrainian National Technical University. - Kropyvnytskyi, 2024/

The qualification thesis is dedicated to the development of research on the combustion of shredded wood biomass and the improvement of fuel devices to enhance the efficiency of this process. The study investigated the specifics of this process both with and without heat dissipation, and determined the requirements for effective combustion of wood biomass in fuel devices.

By applying the combustion reaction kinetics equation and the least squares method, a system of equations was developed for calculating the kinetic constants of wood combustion reactions, using results from the non-isothermal

method of studying this process.

Experimental research was conducted, and the elemental composition of various types of wood, including fast-growing species, was determined. Based on thermogravimetric analysis, kinetic constants for the combustion reaction of shredded wood were obtained, as well as analytical dependencies of relative mass loss on inverse temperature, which allows the study of the stages of the combustion process and the formulation of requirements for the combustion conditions of this wood type in fuel devices. Additionally, the impact of the air excess coefficient on the fuel regime when burning genetically modified wood was determined, which enables the selection of optimal combustion process parameters and reduces the emission of harmful substances.

HEAT GENERATION, WOOD FUEL, BIOMASS BOILER, ENERGY EFFICIENCY.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ.....	16
1.1 Специфіка процесів спалювання подрібненої деревної біомаси...	16
1.2 Оцінка теплоенергетичних властивостей деревної біомаси	20
1.3 Огляд ресурсного потенціалу та характеристик деревних відходів	23
1.4 Теплота згорання деревної біомаси	25
1.5 Фракційний склад біопалива та його класифікація	27
1.6 Технологічні підходи до спалювання деревної біомаси	29
1.7 Підвищення екологічності процесів спалювання деревної біомаси.....	32
Висновки до розділу 1.....	35
2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ БІОЛОГІЧНОЇ СИРОВИНИ	36
2.1 Опис процесу відходів деревини	36
2.2 Дослідження самозаймання з урахуванням процесу тепловідведення.....	39
2.3 Дослідження неізотермічного методу для визначення кінетичних параметрів біомаси.....	41
Висновки до розділу 2.....	44
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ	45
3.1 Експериментальне обладнання для дослідження кінетичних параметрів процесу горіння	46
3.2 Методика встановлення хімічного складу зразків шляхом експерименту	51

3.3	Експериментальні методи визначення кінетичних параметрів горіння подрібненої деревної біомаси	53
3.4	Методика обробки експериментальних даних	58
	Висновки до розділу 3.....	62
4.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ПОДРІБНЕНОЇ БІОМАСИ	63
4.1	Визначення закономірностей процесу горіння деревної біомаси .	63
4.2	Аналіз експериментальних досліджень процесу спалювання деревної біомаси	70
4.3	Аналіз експериментальних досліджень процесу самозагорання деревної біомаси	72
	Висновки до розділу 4.....	76
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	77
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79
	ДОДАТКИ.....	83
	Додаток А.....	84
	ОХОРОНА ПРАЦІ	84
A1.	Аналіз небезпечних та шкідливих факторів на підприємстві та заходи по їх усуненню	84
A.2.	Розрахунок блискавкозахисту для будівлі	85
	Додаток Б.....	88
	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВИБОРУ БІОПАЛИВНОЇ КОТЕЛЬНІ	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПЕР - паливно-енергетичні ресурси;

СЕУ - сонячна електрична установка;

ТЕЦ – теплоелектроцентр

ІТП – індивідуальний тепловий пункт

ГВП- гаряче водопостачання

ТП – тепловий пункт

DTA - диференціальний термічний аналіз

TG – термогравіметричний аналіз

DTG - швидкість зміни маси речовини.

T

ВСТУП

У сучасних умовах глобальних екологічних викликів і потреби у зниженні залежності від викопних енергоносіїв питання використання відновлюваних джерел енергії набуває все більшої актуальності. Одним із перспективних напрямів є використання відходів деревини для теплогенерації. Такий підхід дозволяє не лише забезпечити енергетичну незалежність підприємств, а й вирішувати проблему утилізації деревних відходів.

На світовому рівні багато країн активно впроваджують технології використання біомаси, включаючи відходи деревини, для виробництва теплової енергії. Лідерами у цій сфері є країни Європейського Союзу, де розвиток технологій біоенергетики підтримується на державному рівні через субсидії, законодавчі стимули та програми декарбонізації. В Україні інтерес до використання деревних відходів також зростає, особливо в контексті енергетичної незалежності та скорочення викидів парникових газів. Проте цей напрям ще не досяг високого рівня розвиненості через низку технічних, економічних та законодавчих бар'єрів.

Актуальність дослідження обумовлена зростанням кількості відходів деревини на деревообробних підприємствах, які часто залишаються невикористаними або утилізуються екологічно небезпечним шляхом. Використання цих відходів для теплогенерації може стати ефективним рішенням для зменшення витрат на енергоресурси, зниження екологічного навантаження та підвищення енергетичної ефективності.

Згідно з останніми публікаціями у галузі, ефективність використання деревних відходів як енергетичного ресурсу залежить від впровадження сучасних технологій спалювання, газифікації чи піролізу, а також від оптимізації логістичних та управлінських процесів. Важливу роль відіграє

доступність технологій і фінансування інноваційних рішень.

Розвиток теплогенерації на основі деревних відходів стикається з низкою об'єктивних перешкод, які уповільнюють впровадження таких технологій на підприємствах. Їх можна розділити на кілька основних категорій.

В Україні законодавча база, що регулює використання біомаси, включаючи відходи деревини, залишається недостатньо розробленою. Відсутність чітких механізмів підтримки підприємств, які впроваджують енергетичні рішення на основі деревних відходів, а також нестача пільг або субсидій для таких ініціатив створюють значні труднощі. Крім того, законодавство часто не враховує регіональні особливості, наприклад, доступність сировини чи локальні екологічні виклики.

Багато деревообробних підприємств в Україні використовують застаріле обладнання, яке не пристосоване до енергетичного використання відходів деревини. Установка сучасних котлів або теплогенераторів потребує значних інвестицій, які не завжди доступні підприємствам, особливо малим і середнім. Також нерідко бракує технічних знань і кваліфікованих фахівців для експлуатації таких систем.

Хоча використання деревних відходів є економічно вигідним у довгостроковій перспективі, початкові витрати на модернізацію технологічного процесу часто є надто високими. Інвестиційний клімат у секторі біоенергетики залишається слабким, що обмежує доступ до фінансування. Крім того, відсутність фінансових стимулів з боку держави зменшує привабливість таких проєктів для інвесторів.

Організація збору, транспортування та зберігання деревних відходів є ще одним викликом. Зазвичай деревні відходи утворюються нерівномірно, а їхня обробка та транспортування можуть потребувати додаткових ресурсів і обладнання. Це особливо актуально для підприємств,

розташованих у віддалених регіонах, де відсутня відповідна інфраструктура.

Серед власників і керівників деревообробних підприємств часто спостерігається низька обізнаність щодо переваг теплогенерації з використанням деревних відходів. Це може бути пов'язано з недостатньою кількістю інформаційних кампаній, відсутністю прикладів успішного впровадження або страхом перед ризиками, пов'язаними із впровадженням нових технологій.

Хоча використання деревних відходів є екологічно доцільним, спалювання або обробка біомаси може викликати локальні екологічні проблеми, наприклад, забруднення повітря через викиди твердих часток або запахи. Це може спричиняти соціальне невдоволення населення, особливо в густонаселених регіонах.

Для подолання цих перепон потрібен комплексний підхід, що включає розробку сприятливої законодавчої бази, залучення інвестицій, впровадження сучасних технологій, підвищення кваліфікації персоналу та інформаційні кампанії для популяризації переваг використання деревних відходів. Лише системне вирішення цих проблем дозволить максимально ефективно реалізувати потенціал теплогенерації з використанням деревної біомаси.

Використання відходів деревини для теплогенерації має низку важливих переваг, які охоплюють економічні, екологічні та енергетичні аспекти. Це робить даний підхід привабливим як для підприємств, так і для суспільства в цілому.

Деревні відходи, які утворюються в процесі деревообробки, часто вважаються "нульовою" сировиною, оскільки вони не потребують додаткових витрат на придбання. Це значно знижує собівартість енергетичних ресурсів у порівнянні з традиційними видами палива, такими

як вугілля, газ чи мазут. Крім того, використання власних відходів для енергопостачання дозволяє підприємствам скоротити витрати на утилізацію та зменшити залежність від зовнішніх постачальників енергії. Таким чином, підприємство отримує можливість оптимізувати свої витрати й підвищити конкурентоспроможність.

Однією з головних переваг є екологічна складова. Утилізація деревних відходів шляхом їх використання для виробництва енергії дозволяє уникнути накопичення відходів на полігонах або спалювання їх у неконтрольованих умовах, що часто супроводжується виділенням шкідливих речовин. Використання деревної біомаси у спеціалізованих установках забезпечує екологічно безпечне згоряння з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Використання деревних відходів як біопалива сприяє зниженню загального вуглецевого сліду підприємства. Вуглекислий газ, що виділяється під час згоряння деревної біомаси, компенсується тим, що дерева поглинають його під час свого росту. Таким чином, біомаса вважається вуглецево-нейтральним джерелом енергії, на відміну від викопних видів палива, які додають новий вуглець до атмосфери.

Використання деревних відходів дає змогу підприємствам забезпечити власні енергетичні потреби, зменшуючи залежність від зовнішніх постачальників енергоносіїв, таких як природний газ чи електроенергія. Особливо це актуально в умовах нестабільності на енергетичних ринках або у випадку зростання цін на традиційні енергоносії. Локальне використання деревної біомаси підвищує енергетичну безпеку підприємств і регіонів.

Перетворення відходів на ресурс є основою концепції циркулярної економіки, яка спрямована на максимальне використання всіх матеріалів у виробничому циклі. Використання деревних відходів для енергогенерації

дозволяє підприємствам зменшити кількість непотрібних залишків і створити замкнений цикл виробництва, що є ключовим фактором сталого розвитку.

Деревні відходи можуть використовуватися для виробництва теплової енергії, гарячої води, електроенергії або їх комбінації. Це забезпечує гнучкість у виборі енергетичних рішень залежно від потреб підприємства. Сучасні технології, такі як піроліз або газифікація, дозволяють використовувати біомасу з максимальною ефективністю.

Деревна біомаса є широко доступною, особливо в регіонах з розвиненою деревообробною або лісовою промисловістю. Це дозволяє мінімізувати витрати на транспортування сировини та гарантує її стабільне постачання. Для деревообробних підприємств деревні відходи є постійно відновлюваним ресурсом, який утворюється у процесі основної діяльності.

Розвиток біоенергетики сприяє створенню нових робочих місць у сферах обслуговування, транспортування та виробництва енергетичного обладнання. Це особливо важливо для регіонів, де деревообробна промисловість є ключовою галуззю.

Переваги використання деревних відходів у теплогенерації є багатограними та охоплюють економічні, екологічні та соціальні аспекти. Впровадження таких рішень дозволяє підприємствам зменшити витрати, скоротити екологічний вплив і підвищити енергетичну незалежність, водночас сприяючи сталому розвитку галузі та регіону.

Зберігання деревних відходів є ключовим питанням для деревообробних підприємств, які прагнуть використовувати ці залишки для теплогенерації. Основні труднощі зумовлені високою вологістю сировини, її схильністю до самозаймання та втратами енергетичної цінності через гниття. Зокрема, тирса, стружка та тріска, які утворюються під час обробки деревини, можуть швидко накопичуватися, створюючи ризик екологічних

та технічних проблем.

Рішенням цих проблем є перетворення деревних відходів на пелети. Пелети — це пресовані гранули з деревної біомаси, які мають низку переваг. Вони характеризуються низькою вологістю (менше 10%), високою теплотворною здатністю та компактною формою, що значно полегшує їх транспортування та зберігання. Для виробництва пелет використовуються спеціалізовані установки, які висушують сировину, подрібнюють її до дрібної фракції та пресують у гранули. Завдяки цьому пелети забезпечують стабільне та ефективне горіння в сучасних котлах.

Сучасні котли для теплогенерації, які використовують деревні відходи, мають широкий спектр технічних характеристик, що робить їх універсальним рішенням для різних типів об'єктів.

Обрання котла залежить від доступного палива, масштабів підприємства та бюджету. Сучасні моделі забезпечують високу ефективність і низькі викиди, що робить їх екологічно безпечними й економічно вигідними.

Основні результати наукової роботи презентовано на всеукраїнській науково-практичній on-line конференції “Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві” в 2024 році.

РОЗДІЛ 1

1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ

1.1 Специфіка процесів спалювання подрібненої деревної біомаси

Процес спалювання подрібненої деревної біомаси має ряд специфічних особливостей, які визначають ефективність та екологічність цього процесу. У порівнянні з іншими видами палива, спалювання деревної біомаси вимагає врахування різноманітних параметрів, таких як фізико-хімічні властивості палива, температура горіння, наявність кисню та режим горіння.

Основними параметрами, що впливають на спалювання подрібненої деревної біомаси, є вологість, склад та щільність палива. Вологість є одним із ключових чинників, оскільки висока вологість знижує теплотворну здатність палива, а також може призвести до збільшення витрат енергії на випаровування води під час горіння. Підвищена вологість також негативно впливає на стабільність полум'я та рівномірність горіння.

Процес спалювання подрібненої деревної біомаси є складним фізико-хімічним процесом, який включає кілька етапів: нагрівання палива, випаровування вологи, піроліз, горіння летких компонентів і залишкове горіння твердої частини. Кожен з цих етапів безпосередньо впливає на ефективність процесу спалювання, його теплотехнічні та теплофізичні характеристики, що визначають енергоефективність і екологічність технології. Ось детальніший огляд цих етапів, з урахуванням теплотехнічних і теплофізичних параметрів.

Подрібнена деревна біомаса повинна бути підготовлена для спалювання, що включає дроблення деревини до певних розмірів. Цей етап критично важливий для забезпечення необхідної площі контакту палива з

киснем. В ідеалі, біомаса має бути подрібнена до розміру часток від 5 до 50 мм для максимальної ефективності горіння. Вологість палива також повинна бути в межах 15–25%, оскільки вологе паливо потребує більше енергії для досягнення температури горіння, знижуючи загальну ефективність.

Першим етапом спалювання є нагрівання біомаси, яке викликає випаровування води. Вологість деревної біомаси є критичним фактором, оскільки кожен кілограм води поглинає велику кількість енергії при її випаровуванні. Теплотехнічний ефект цього процесу можна описати через специфічну теплоту випаровування води (2260 кДж/кг). Якщо деревина має 30% вологості, то для її повного висушування потрібно витратити значну частину тепла, що виділяється на першому етапі горіння.

При спалюванні біомаси з високим вмістом вологи енергія, що виділяється, йде не на вироблення тепла для опалення або електрогенерації, а на випаровування води. Тому оптимальним рівнем вологості для ефективного спалювання є 15–25%, коли біомаса здатна вивільнити максимальну кількість енергії.

Піроліз — це термічний процес розкладу органічних матеріалів без доступу кисню, що протікає при температурах від 200°C до 500°C. На цьому етапі деревина розкладається на леткі компоненти (піролізні гази) та тверді залишки (вугілля і попіл). Теплотехнічні характеристики піролізу зумовлені теплою, що виділяється під час цього процесу, а також температурними межами, в яких відбувається розклад.

При піролізі деревина виділяє значну кількість летких газів, таких як метан, ацетальдегід, органічні кислоти та смоли. Ці гази є основним джерелом тепла при спалюванні. Середня теплотворна здатність летких компонентів складає близько 15–20 МДж/кг. Залежно від породи деревини та умов піролізу, ці значення можуть варіюватися.

Після піролізу утворені леткі компоненти вступають у реакцію з

киснем, що є основним джерелом тепла при спалюванні біомаси. При згорянні летких компонентів утворюються вуглекислий газ (CO_2) і водяна пара (H_2O), що виділяє значну кількість тепла. Теплотехнічний процес спалювання летких компонентів характеризується високою теплотворною здатністю (15–20 МДж/кг для різних видів біомаси).

Для ефективного горіння летких газів необхідно, щоб температура в зоні спалювання була не менше 800–900°C, а концентрація кисню в системі забезпечувала повне згорання. Якщо кисню недостатньо або температура низька, процес горіння буде неповним, що призведе до утворення шкідливих викидів (монооксид вуглецю, сажа, смоли).

Після того як основна частина летких компонентів згоріла, залишки твердої фази — вуглецеві частинки або попіл — продовжують горіти. Температура на цьому етапі знижена (близько 600–800°C), оскільки вуглець має низьку реакційну здатність з киснем при низьких температурах. Однак ефективне залишкове горіння важливе для зменшення утворення шкідливих викидів, таких як сажа і CO.

Залишкове горіння також залежить від доступу кисню та температури. Важливо, щоб кисень безперервно надходив у зону горіння для забезпечення ефективного спалювання залишкових вуглецевих частинок, оскільки неповне згорання може призвести до утворення диму і неповного спалювання палива.

Процес спалювання біомаси супроводжується викидами вуглекислого газу (CO_2), окислів азоту (NO_x), монооксиду вуглецю (CO), сажі та інших з'єднань. Викиди CO_2 є частиною природного кругообігу вуглецю, оскільки деревна біомаса вбирає вуглець під час росту дерев, і його виділення під час спалювання не має додаткового впливу на парниковий ефект. Однак інші викиди, зокрема частки сажі та окислів азоту, можуть мати негативний вплив на навколишнє середовище та здоров'я людей.

Для зниження викидів шкідливих речовин застосовуються різні

технології, такі як каталітичне очищення димових газів, багатоступеневі котли з високою температурою і низькими викидами, а також ефективні системи фільтрації та димовідведення. У процесах горіння біомаси важливо також мінімізувати утворення сажі, що є побічним продуктом неповного згоряння.

Теплотехнічні та теплофізичні параметри горіння суттєво впливають на ефективність спалювання деревної біомаси. Для забезпечення повного згоряння біомаси температура повинна бути не менше 800–900°C. Вища температура сприяє кращому спалюванню летких компонентів і зменшенню утворення шкідливих викидів. Потрібно забезпечити оптимальне співвідношення кисню в зоні горіння, оскільки недостатня кількість кисню може призвести до утворення монооксиду вуглецю (CO), а також до неповного спалювання, що погіршує ефективність. Розмір часток*: Тонко подрібнена біомаса має вищу поверхню контакту з киснем, що дозволяє досягти кращих показників горіння, оскільки горіння відбувається швидше і більш рівномірно.

Процес спалювання подрібненої деревної біомаси є багатоступінчастим термічним процесом, в якому важливими є параметри температури, вологості, кисню та розміру часток. Для досягнення максимальної енергоефективності важливо оптимізувати ці параметри, а також забезпечити належну підготовку палива. Врахування теплофізичних характеристик, таких як температура горіння, теплотворна здатність, вміст летких компонентів і щільність палива, дозволяє досягти стабільної та економічно ефективної енергетичної генерації на основі деревної біомаси. Фракційний склад подрібненої деревної біомаси також має важливе значення для процесу горіння. Чим менші частки палива, тим ефективніше воно згорає, оскільки дрібні частинки мають велику площу поверхні, що покращує їх взаємодію з киснем. Проте, надто дрібні частинки можуть призвести до утворення пилу, що може зашкодити ефективності роботи котлів та спричинити забруднення навколишнього середовища. Тому для

досягнення оптимального процесу горіння важливо дотримуватись певного розміру фракцій.

1.2 Оцінка теплоенергетичних властивостей деревної біомаси

Фізико-хімічні властивості біомаси, зокрема деревної, є важливим чинником, який визначає її ефективність при використанні як джерела енергії для спалювання, газифікації або інших теплогенераційних процесів. Для України, де основними деревними породами є сосна, дуб, ясен, береза та інші, ці властивості мають велике значення для оптимізації процесів спалювання, вибору обладнання та підвищення ефективності використання деревних відходів. Далі розглянемо основні фізико-хімічні характеристики деревини найбільш поширених порід в Україні.

Оцінка теплоенергетичних властивостей деревної біомаси є важливим аспектом при її використанні для енергетичних цілей, зокрема для спалювання, газифікації або пелетизації. Основні теплоенергетичні властивості деревної біомаси включають її теплотворну здатність, вологість, щільність, вміст летких сполук, а також хімічний склад, які разом визначають ефективність та екологічність енергетичного використання цього виду палива.

Теплотворна здатність деревної біомаси є одним з основних показників її ефективності як джерела енергії. Вона визначає кількість тепла, яке може бути отримано при повному спалюванні одиниці маси біомаси. Теплотворна здатність залежить від хімічного складу палива, зокрема вмісту вуглецю, водню, кисню, а також від рівня вологості.

Для ****сухої деревини**** теплотворна здатність варіюється залежно від породи. Так, у сосни вона становить близько 17–18 МДж/кг, у дуба – 18–20 МДж/кг, у ясени – 18–19 МДж/кг, а у берези – близько 17 МДж/кг.

- Для ****вологого палива**** (наприклад, деревина з вологістю понад

40%) ця цифра знижується через енергію, що йде на випаровування води. Високий вміст вологи у деревині знижує ефективність спалювання, оскільки частина енергії витрачається на випаровування води, а не на тепловиділення.

Вологість деревної біомаси є критичним параметром для її теплоенергетичних властивостей, оскільки вона безпосередньо впливає на теплотворну здатність палива. Високий рівень вологості знижує енергоефективність спалювання, оскільки значна частина тепла витрачається на випаровування води.

При вологості понад 50% спалювання деревини стає значно менш ефективним, оскільки тепло від спалювання йде на випаровування води, а не на нагрівання теплогенераційних систем.

Для досягнення максимальної ефективності в енергетичних процесах вологість палива повинна бути знижена до 15–20%. Для цього біомасу часто сушать, або використовують процеси, що дозволяють знижувати вологість, наприклад, пелетизацію або газифікацію.

Щільність деревної біомаси впливає на її енергетичну щільність, тобто на кількість енергії, яку можна отримати з одиниці об'єму. Вища щільність палива дозволяє зменшити обсяг, необхідний для досягнення певної енергетичної ефективності, що особливо важливо для транспортування та зберігання палива.

Дуб, як важка тверда порода, має високу щільність (700–800 кг/м³), що робить його енергетично ефективним. Сосна має меншу щільність (500–550 кг/м³), але завдяки меншому вмісту води і високій теплотворній здатності може бути досить ефективною при оптимальних умовах. Ясен має щільність близько 650–750 кг/м³, що робить його також енергетично ефективним паливом. Береза має середню щільність (550–600 кг/м³), що дозволяє її використовувати, хоча з дещо меншою енергетичною ефективністю у порівнянні з дубом чи ясенем.

Леткі сполуки (піролізні гази), що утворюються під час горіння

деревної біомаси, відіграють важливу роль у процесі енергетичного використання. Їх вміст залежить від породи деревини та умов спалювання. Зазвичай, чим більше летких сполук, тим ефективніше відбувається процес горіння, оскільки ці гази можуть згоряти при взаємодії з киснем.

Сосна має високу кількість летких сполук, що забезпечує хорошу взаємодію з киснем і ефективне горіння. Дуб та ясень містять менше летких сполук порівняно з хвойними породами, але завдяки більшій щільності та вищій теплотворній здатності вони все одно є ефективними для отримання енергії.

Хімічний склад деревної біомаси, зокрема вміст вуглецю, водню, кисню та азоту, визначає як процес горіння, так і викиди шкідливих газів, таких як діоксид вуглецю (CO_2), окис азоту (NO_x) та сажа.

Деревина сосни містить значну кількість смолистих речовин, що може призвести до утворення кіптяви та викидів шкідливих газів, якщо горіння не контролюється належним чином. Дуб містить більше лігніну, що покращує стабільність горіння, зменшує утворення шкідливих викидів і збільшує теплотворну здатність. Ясень має значну кількість целюлози та лігніну, що робить його хорошим паливом з точки зору стабільності процесу горіння та зниження викидів. Береза містить велику кількість летких сполук, що дозволяє їй швидко загорятися, однак може бути більш схильною до утворення сажі при неповному згорянні.

Високий вміст вологи в біомасі значно знижує її теплотворну здатність. Для деревини з вологістю понад 50% теплотворна здатність знижується приблизно на 30-40%, оскільки енергія витрачається на випаровування води. Тому для покращення теплоенергетичних властивостей палива важливо забезпечити його висушування до рівня, близького до 15–20%.

Оцінка теплоенергетичних властивостей деревної біомаси дозволяє зрозуміти, які породи та якість палива є найкращими для використання в системах теплогенерації. Високоякісне паливо з низьким рівнем вологості,

високою щільністю та відповідним вмістом летких сполук забезпечує високий рівень теплотворної здатності, що важливо для забезпечення ефективного та економічного процесу спалювання. Для підвищення ефективності використання деревної біомаси необхідно контролювати вологість, щільність і хімічний склад палива, а також використовувати відповідне обладнання для його обробки та спалювання.

1.3 Огляд ресурсного потенціалу та характеристик деревних відходів

Деревну біомасу, що використовується безпосередньо в котлоагрегатах, зазвичай називають робочим паливом. Склад цієї біомаси, тобто її елементний вміст, можна описати рівнянням:

$$C_p + H_p + O_p + N_p + S_p + A_p + W_p = 100\%, \quad (1.1)$$

де C_p , H_p , O_p , N_p – це відповідно вміст вуглецю, водню, кисню та азоту в деревній біомасі, виражений у відсотках; S_p , A_p , W_p – показники вмісту золи і води в паливі.

Для оцінки палива в теплотехнічних розрахунках часто використовують такі поняття, як суха маса та горюча маса палива.

Суха маса палива – це біомаса, що була висушена до абсолютно сухого стану. Склад сухої маси виражається рівнянням:

$$C_s + H_s + O_s + N_s + A_s = 100\%. \quad (1.2)$$

Горюча маса палива – це біомаса, з якої були видалені вода і зола. Склад горючої маси визначається рівнянням:

$$C_{\Gamma} + H_{\Gamma} + O_{\Gamma} + N_{\Gamma} = 100\%. \quad (1.3)$$

Індекси біля символів компонентів біомаси вказують на їх вміст у різних формах: р – робоча маса, с – суха маса, г – горюча маса палива.

Основні елементи, що входять до складу деревної біомаси, — це вуглець (C), водень (H), кисень (O), азот (N), сірка (S), а також інші елементи в меншій кількості, такі як калій (K), кальцій (Ca), магній (Mg), фосфор (P), кремній (Si), натрій (Na) та інші.

Вуглець є основним елементом деревної біомаси і становить більшу частину її маси. Він є джерелом тепла при спалюванні, оскільки його окислення в атмосфері кисню дає найбільшу кількість енергії. Вміст вуглецю в деревній біомасі зазвичай коливається від 40% до 50% в сухій масі. Вуглець визначає теплотворну здатність біомаси, яка, як правило, становить 15–20 МДж/кг для сухої деревини. Вміст водню в деревній біомасі зазвичай складає 5–6% у сухій масі. Водень сприяє утворенню водяної пари під час горіння, що, у свою чергу, може впливати на ефективність та температуру горіння. Кисень є основним елементом, що входить до складу органічних сполук деревної біомаси, таких як целюлоза та лігнін. Його вміст у деревній біомасі зазвичай становить 35–45% в сухій масі. Кисень є важливим компонентом для реакцій окислення при спалюванні, однак надмірний вміст кисню в деревній біомасі знижує її теплотворну здатність. Азот є елементом, який в невеликих кількостях присутній у деревній біомасі. Він не бере участі в процесах горіння, але при високих температурах може утворювати оксиди азоту (NO_x), які є шкідливими для навколишнього середовища. Вміст азоту в деревній біомасі зазвичай невеликий — близько 0.1–0.3% в сухій масі. Сірка також є присутньою в деревній біомасі, хоча її вміст зазвичай дуже низький. Вона може бути джерелом утворення сірчаних газів під час горіння, таких як діоксид сірки (SO_2), що може призвести до забруднення атмосферного повітря. Вміст сірки в деревній біомасі часто не перевищує 0.1% в сухій

масі.

Вуглець, водень і кисень є основними елементами, які визначають теплотворну здатність біомаси. Вищий вміст вуглецю і водню призводить до збільшення теплотворної здатності. Азот і сірка можуть призводити до утворення токсичних газів і забруднення навколишнього середовища, тому важливо мінімізувати їх вміст у біомасі. Калій і кальцій можуть впливати на утворення попелу, що може знижувати ефективність спалювання та призводити до забруднення котлів і димових труб.

Елементний склад деревної біомаси є важливим чинником, що визначає її енергетичний потенціал. Основними компонентами є вуглець, водень і кисень, що забезпечують теплотворну здатність і ефективність горіння. Для забезпечення високої енергетичної ефективності і мінімальних викидів при спалюванні біомаси важливо мати оптимальний баланс між вмістом цих елементів та контролювати вміст шкідливих компонентів, таких як азот і сірка.

1.4 Теплота згорання деревної біомаси

При вивченні процесів спалювання деревної біомаси використовуються поняття вищої та нижчої теплоти згорання. Вища теплота згорання визначається як кількість тепла, що вивільняється при згорянні 1 кг біомаси, за умови повної конденсації всіх парів води, які утворюються під час горіння, з урахуванням тепла, що витрачається на їх випаровування, тобто прихованої теплоти пароутворення [70–74, 91, 104].

Вища теплота згорання ($Q_{вр}$) обчислюється за (кДж/м³):

$$Q_{вр} = 4,187 * (81C_p + 300H_2p - 26(Op - Sp)) \quad (1.4)$$

Нижча теплота згорання – це кількість тепла, що виділяється при згорянні 1 кг біомаси, без врахування тепла, що витрачається на

випаровування води, яка утворюється в процесі горіння. Визначення нижчої теплоти згорання проводиться за наступною формулою (кДж/кг):

$$Q_{\text{нр}} = 0,339C_p + 1,03H_p - 0,109(O_p - S_p) - 0,25W_p \quad (1.5)$$

Теплота згорання стовбурової деревини безпосередньо залежить від вмісту золи та води. Формула для розрахунку теплоти згорання стовбурової деревини при різних значеннях вологості та зольності виглядає наступним чином:

$$Q_{\text{нр}} = 18900 - 214W_p - 189A_p \quad (1.6)$$

де $Q_{\text{нр}}$ – теплота згорання стовбурової деревини при вологості W_p і зольності A_p , кДж/кг.

Дослідження теплоти згорання кори різних порід деревини є обмеженими, тому можна використовувати орієнтовні значення цього параметра. Для орієнтованих розрахунків нижча теплота згорання кори різних порід деревини (кДж/кг) може бути такою: кора сосни $Q_{\text{нр}} = 20891$, кора ялини $Q_{\text{нр}} = 19333$, кора берези $Q_{\text{нр}} = 19952$, кора осики $Q_{\text{нр}} = 20880$, кора модрина $Q_{\text{нр}} = 21770$.

Нижча теплота згорання кори та гнилої деревини для різної вологості і зольності може бути розрахована за допомогою наступної формули:

$$Q_{\text{нр}} = Q_{\text{нг}}(100 - W_p - A_p)/100 - 25W_p, \quad (1.7)$$

де $Q_{\text{нр}}$ та $Q_{\text{нг}}$ – теплота згорання деревної кори на робочу і горючу масу, кДж/кг.

Теплота згорання гнилої деревини в корозійному типі менша, а в деструктивному типі більша порівняно з нормальною деревиною. Для

гнилої деревини, як і для кори, розрахунок теплоти згорання проводиться за аналогічною формулою.

Теплота згорання елементів крони для наближених розрахунків вважається рівною теплоті згорання стовбурової деревини тієї ж породи

1.5 Фракційний склад біопалива та його класифікація

Фракційний склад подрібненої деревної біомаси має вирішальний вплив на її енергетичну ефективність та екологічні характеристики при спалюванні. Під фракційним складом розуміється розподіл часток біомаси за розмірами після механічного оброблення, що включає подрібнення деревини та її відходів до певних розмірів. Вибір технології подрібнення та подальша обробка визначають розподіл часток, що, в свою чергу, впливає на швидкість та ефективність згорання, а також на параметри теплоенергетичних процесів.

Визначення фракційного складу деревної біомаси важливе для оптимізації процесу її спалювання в котельних установках. Подрібнена деревна біомаса класифікується за розмірами часток:

Мікрофракції (менше 1 мм) — це дуже дрібні частки, які утворюються переважно в результаті обробки пилу або дрібних відходів. Хоча вони мають високу теплоту згорання, їх надзвичайно швидке випаровування води та сильне розсіювання при спалюванні можуть знижувати ефективність теплогенерації, а також створювати технічні труднощі у вигляді пилових викидів та небезпеки утворення нальотів на котлах.

Мікро- і мезофракції (від 1 до 10 мм) — це оптимальний діапазон розмірів для спалювання, оскільки частки такого розміру забезпечують стабільне та ефективне горіння, забезпечуючи гарне співвідношення між швидкістю згорання та теплоенергетичними характеристиками. Вони

характеризуються високою теплотворною здатністю і добре транспортуються в котлі, що сприяє рівномірному горінню.

Макрофракції (понад 10 мм) — великі частки, що утворюються при обробці великих деревних відходів або великих шматків колод. Для ефективного спалювання таких фракцій необхідно застосовувати спеціалізовані котли, здатні підтримувати потрібну температуру та доступ повітря до великих часток, щоб забезпечити їх повне згорання. Інакше велика частка таких фракцій може призвести до неповного згорання, що збільшує викиди шкідливих речовин та знижує ефективність теплоенергетичного процесу.

Фракційний склад деревної біомаси безпосередньо впливає на швидкість та рівномірність процесу згорання, що визначає її ефективність як джерела енергії. Маленькі частки біомаси мають більшу площу поверхні, що сприяє більш швидкому доступу кисню та згоранню. Це дозволяє знижувати час горіння і досягати максимальної теплотворної здатності.

З іншого боку, великі фракції вимагають значно більше часу для повного згорання, оскільки процеси нагрівання та випаровування води у великій масі займають більше часу. Це може призводити до того, що викиди шкідливих газів, таких як чадний газ (CO) або неорганічні сполуки, будуть вищими, а ефективність спалювання — нижчою. Для цього можуть бути використані котли з спеціальними конструкціями, що дозволяють регулювати температуру, подачу кисню та інші параметри горіння, забезпечуючи ефективне згорання навіть великих фракцій.

Технічна оптимізація фракційного складу біомаси включає кілька підходів, зокрема:

1. Вибір технології подрібнення — застосування різних типів дробарок, таких як молоткові, роторні або барабанні дробарки, дозволяє досягти різних розмірів часток. Молоткові дробарки, наприклад, дозволяють отримувати дрібні частки (мікрофракції), тоді як роторні дробарки дають більші фракції.

2. Сортивання фракцій — для підвищення ефективності спалювання після подрібнення біомасу можна сортувати за розмірами, що дозволяє створити оптимальні умови для горіння. Вибіркове використання різних фракцій, наприклад, середніх розмірів (3-8 мм), забезпечує максимальну теплоту згорання при мінімальних викидах.

3. Автоматизація процесу — для забезпечення рівномірного горіння та контролю за ефективністю можна застосовувати автоматизовані системи подачі палива, що дозволяють підтримувати потрібний склад фракцій у процесі спалювання та мінімізувати втрати тепла.

Фракційний склад подрібненої деревної біомаси є важливим параметром, що впливає на ефективність процесів її спалювання та на енергетичну продуктивність. Врахування фракційного складу є важливим аспектом для розробки та вдосконалення систем теплогенерації на основі біомаси.

1.6 Технологічні підходи до спалювання деревної біомаси

Процес прямого спалювання деревної біомаси являє собою складний комплекс термохімічних перетворень, що послідовно відбуваються при взаємодії палива з окислювачем. Фундаментальне розуміння цих процесів базується на аналізі чотирьох основних стадій термічної деструкції біомаси. На першій стадії, при температурах до 150°C, відбувається сушіння матеріалу, що супроводжується ендотермічним процесом випаровування вологи з питомою витратою енергії 2,26 МДж на кілограм води. Друга стадія - піроліз, що протікає в діапазоні температур 150-600°C, характеризується термічним розкладанням органічної речовини з утворенням летких компонентів, переважно CO, H₂, CH₄, CO₂, та твердого вуглецевого залишку.

При подальшому підвищенні температури до 600-1000°C реалізується стадія газифікації, під час якої відбувається взаємодія вуглецю з окислювачем та продуктами горіння, що призводить до утворення додаткової кількості горючих газів. Завершальна стадія процесу - високотемпературне окислення при 1000-1200°C, під час якого відбувається повне згоряння горючих компонентів з виділенням теплової енергії.

Технологічна реалізація процесу прямого спалювання може здійснюватися трьома основними методами: шаровим, вихровим та факельним спалюванням. Кожен з цих методів має свої особливості та потребує специфічних підходів до оптимізації. При шаровому спалюванні ключовим фактором ефективності є організація багатозонної подачі повітря. Первинне повітря з коефіцієнтом надлишку $\alpha_1 = 0,6-0,8$ подається під колосникову решітку, забезпечуючи газифікацію палива в шарі. Вторинне повітря ($\alpha_2 = 0,3-0,4$) вводиться над шаром для спалювання летких компонентів, а третинне повітря ($\alpha_3 = 0,1-0,2$) забезпечує допалювання продуктів неповного згоряння.

Суттєвий вплив на ефективність шарового процесу має висота шару палива, яка повинна підтримуватися в діапазоні $H = (15-20) \times d$, де d - характерний розмір частинок. При цьому гідравлічний опір шару має становити 500-1500 Па, а швидкість фільтрації повітря - 0,5-1,5 м/с. Застосування механізованих колосникових решіток з водяним охолодженням та можливістю секційного регулювання дозволяє додатково підвищити ефективність процесу.

Вихрове спалювання характеризується більш складною аеродинамікою процесу. Оптимальні параметри досягаються при тангенціальній швидкості потоку 15-25 м/с, критерії крутки 1,5-2,5 та числі Россбі 0,3-0,6. Температурний режим в ядрі вихору підтримується на рівні 1100-1300°C, що забезпечує час перебування частинок 2-3 секунди.

Важливим елементом оптимізації є організація рециркуляції з коефіцієнтом 0,15-0,25 та температурою рециркуляційних газів 400-600°C.

Факельне спалювання вимагає найбільш ретельної підготовки паливоповітряної суміші. Оптимальна концентрація палива становить 0,4-0,6 кг/кг при швидкості подачі 20-30 м/с та куті розкриття факела 30-45 градусів. Температура в ядрі факела підтримується на рівні 1200-1400°C, забезпечуючи час перебування частинок 1-2 секунди.

Характеристики палива суттєво впливають на ефективність різних технологій спалювання. Вологість палива визначає його теплотворну здатність відповідно до залежності:

$$Q_n = Q_c(1-W) - 2,5W, \quad (1.8)$$

де Q_c - теплота згоряння сухої маси, а W - відносна вологість. При цьому існують технологічні обмеження: для шарового спалювання допускається вологість до 60%, для вихрового - до 45%, для факельного - до 30%.

Фракційний склад палива також має критичне значення. Шарове спалювання допускає використання частинок розміром 10-100 мм, вихрове - 2-10 мм, факельне - 0,1-2 мм. Швидкість вигорання частинок визначається залежністю:

$$v = k \times S/d, \quad (1.9)$$

де k - константа швидкості реакції, S - питома поверхня частинок, d - їх характерний розмір.

Зольність та хімічний склад палива впливають на експлуатаційні показники через температуру плавлення золи. Початок деформації золи спостерігається при 800-1200°C, розм'якшення - при 1000-1400°C, плавлення - при 1100-1500°C. Ці характеристики визначають схильність до

шлакування поверхонь нагріву, інтенсивність корозії та ерозійного зносу обладнання.

Ефективність процесів спалювання оцінюється комплексом показників. ККД прямого використання тепла становить 65-90%, коефіцієнт використання палива - 80-95%, а питома теплова потужність - 0,3-1,2 МВт/м³. Екологічні показники характеризуються емісією СО на рівні 50-250 мг/м³, NO_x - 100-400 мг/м³, твердих частинок - 20-150 мг/м³. Експлуатаційна надійність установок визначається коефіцієнтом готовності 0,92-0,98 при терміні служби 15-20 років.

1.7 Підвищення екологічності процесів спалювання деревної біомаси

Інтенсифікація теплообміну при спалюванні деревної біомаси являє собою комплексну задачу, що охоплює всі стадії термохімічного перетворення палива та теплопередачі до теплоносія. Основними механізмами теплообміну в топкових пристроях є променевий та конвективний теплообмін, причому їх співвідношення суттєво залежить від технології спалювання та конструктивних особливостей установки.

При шаровому спалюванні інтенсифікація теплообміну досягається оптимізацією аеродинамічного режиму в шарі палива. Експериментально встановлено, що максимальна інтенсивність теплообміну спостерігається при числі Рейнольдса $Re = 150-200$ для фільтраційного потоку в шарі. При цьому коефіцієнт тепловіддачі від газів до частинок палива досягає 80-120 Вт/(м²·К). Застосування попереднього підігріву повітря до температур 200-300°C дозволяє підвищити інтенсивність теплообміну на 20-30% за рахунок збільшення температурного напору та швидкості хімічних реакцій.

Особливу роль в інтенсифікації теплообміну відіграє організація вторинного випромінювання від склепіння топки та вогнетривкої

футеровки. Температура внутрішніх поверхонь топки підтримується на рівні 800-1000°C, що забезпечує густину променевого теплового потоку 40-60 кВт/м². Використання спеціальних конструкцій склепіння з розвиненою поверхнею дозволяє збільшити ефективність випромінювання на 15-25%.

У системах з вихровим спалюванням інтенсифікація теплообміну досягається за рахунок високої турбулентності потоку при числах Рейнольдса $Re = 10^4-10^5$. Експериментально встановлено, що коефіцієнт тепловіддачі в вихровій камері може досягати 150-200 Вт/(м²·К). Важливим фактором є організація внутрішньої рециркуляції продуктів згоряння, що забезпечує стабілізацію процесу горіння та більш рівномірний розподіл температур.

Факельне спалювання характеризується найвищими локальними коефіцієнтами теплообміну, що досягають 250-300 Вт/(м²·К) в активній зоні факела. Інтенсифікація теплообміну забезпечується оптимізацією аеродинамічної структури факела та застосуванням закручування потоку з числом крутки $S = 1,2-1,5$. При цьому важливо забезпечити оптимальне співвідношення довжини факела до діаметру топкової камери $L/D = 2,5-3,0$.

Екологічні аспекти процесів спалювання біомаси потребують комплексного підходу до зниження шкідливих викидів. Основними забруднюючими речовинами є оксиди азоту NO_x, монооксид вуглецю CO, тверді частинки та органічні сполуки. Формування NO_x відбувається переважно за термічним механізмом при температурах вище 1300°C. Зниження емісії NO_x досягається застосуванням ступеневого спалювання з коефіцієнтом надлишку повітря в первинній зоні $\alpha_1 = 0,6-0,7$. Експериментально доведено, що така організація процесу дозволяє знизити викиди NO_x на 40-60%.

Рециркуляція димових газів є ефективним методом зниження температури в зоні горіння та, відповідно, утворення NO_x. При коефіцієнті рециркуляції $r = 0,15-0,20$ досягається зниження емісії NO_x на 30-40% без суттєвого погіршення економічності процесу. Додаткове зниження викидів

NO_x на 25-35% забезпечується впорскуванням води або пари в зону горіння в кількості 5-10% від витрати палива.

Емісія CO та продуктів неповного згоряння мінімізується забезпеченням оптимального температурного режиму (1000-1100°C) в зоні допалювання та достатнього часу перебування (1,5-2,0 с). Важливу роль відіграє турбулентне перемішування потоків, що характеризується критерієм Пекле $Re > 10^4$. Застосування спеціальних конструкцій завихрювачів дозволяє підвищити ефективність перемішування на 20-30%.

Очищення димових газів від твердих частинок реалізується багатоступеневими системами, що включають циклони, електрофільтри та рукавні фільтри. Циклони забезпечують уловлювання частинок розміром більше 10 мкм з ефективністю 85-90%. Електрофільтри дозволяють досягти ефективності очищення 99,5-99,9% для частинок розміром до 1 мкм при питомій витраті електроенергії 0,1-0,2 кВт·год/1000 м³ газів. Рукавні фільтри забезпечують залишкову запиленість димових газів менше 10 мг/м³.

Важливим аспектом екологічності є утилізація золи та шлаку. Зола деревної біомаси містить значну кількість калію (3-4%) та фосфору (1-2%), що дозволяє використовувати її як органо-мінеральне добриво. Експериментально підтверджено підвищення врожайності сільськогосподарських культур на 15-20% при внесенні золи в дозах 0,5-1,0 т/га.

Висновки до розділу 1

У розділі виконано аналіз паливно-енергетичного комплексу України, з якого необхідність реконструкції теплоенергетичних систем постає як критично важливе інженерне завдання, спрямоване на оптимізацію енергетичної інфраструктури.

Загальний аналіз вітчизняних та міжнародних науково-технічних джерел виявляє методологічну недостатність емпіричної бази та унеможливорює повноцінну діагностику проблемних аспектів модернізації теплоенергетичних комплексів. Як наслідок, більшість академічних публікацій має виключно теоретико-концептуальний характер, позбавлений конкретних інженерно-технологічних пропозицій.

Проте можливий спектр потенційних інженерних рішень для підвищення енергоефективності галузі є доволі широким, проте їх впровадження вимагає дорогих інноваційних технологічних рішень і сучасного високотехнологічного обладнання.

Проведено детальний аналіз особливостей спалювання подрібненої деревної біомаси її склад та теплоенергетичні характеристики. Ці параметри мають ключове значення для розробки ефективних паливних пристроїв, адаптованих до специфіки використання такої сировини.

Встановлено, що відходи деревини можуть забезпечувати енергетичну цінність, близьку до характеристик звичайної паливної деревини. Це підкреслює їхню актуальність як відновлюваного енергетичного ресурсу.

Проаналізовано різні типи паливних пристроїв, що застосовуються для спалювання подрібненої деревної біомаси. Встановлено, що найбільш доцільним є використання камерних паливних установок. Такі пристрої забезпечують високий коефіцієнт корисної дії, що робить їх оптимальним вибором для реалізації енергетичних проєктів із використанням біомаси.

РОЗДІЛ 2

2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ БІОЛОГІЧНОЇ СИРОВИНИ

2.1 Опис процесу відходів деревини

У цьому розділі розглядається процес спалювання подрібненої деревної біомаси в паливній камері. Для розрахунку вигорання летких компонентів використовуються ефективні значення кінетичних констант, що відповідають конкретним умовам.

Процес самозапалювання характеризується змінами трьох ключових параметрів по довжині камери: температури, концентрації деревинних часток і кисню. Математичну модель цього процесу можна представити у вигляді системи рівнянь, що описують тепловий баланс реагуючої суміші та матеріальний баланс кисню й деревних часток, що взаємодіють у камері спалювання.

З рівняння теплового балансу для реагуючої суміші, що вказує на взаємодію між виділеною теплотою, що витрачається на нагрівання суміші та виділяється в навколишнє середовище, маємо рівняння:

$$Q^{\cdot}p - Q^{\cdot}h - Q^{\cdot}T = 0 \quad (2.1)$$

де $Q^{\cdot}p$ — теплота, що виділяється в процесі хімічної реакції суміші в елементарному об'ємі, $Q^{\cdot}h$ — теплота, витрачена на нагрівання суміші, і $Q^{\cdot}T$ — теплота, що йде через стінки камери в навколишнє середовище.

У разі рівномірного розподілу частинок подрібненої деревини в паливо-повітряній суміші, тепловиділення в елементарному об'ємі на ділянці камери $dx dx$ можна записати за такою формулою:

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \cdot f \cdot Q \cdot C \cdot \mu}{\pi \cdot d^2} \quad (2.2)$$

де k_0 — передекспоненційний множник (s^{-1}); β — стехіометричний коефіцієнт; E — енергія активації (кДж/моль); R — універсальна газова стала (8,314 кДж/моль); T — температура суміші, К; C і μ — концентрації кисню та деревних часток відповідно ($кг/м^3$) для тиску 0,1013 МПа та температури 20°C; f і Q — питома площа поверхні і теплота згорання деревних часток ($м^2/кг$ та $кДж/кг$); d — діаметр камери (м).

Ця модель дозволяє детально описати динаміку процесу самозапалювання та вигорання деревної біомаси в умовах паливної камери, що є важливим для розрахунку і оптимізації теплогенераційних процесів. Вичленивши у виразі (2.2) безрозмірні концентрації кисню, палива та температури:

$$\Theta = \frac{RT}{E}, \quad (2.3)$$

Можна отримати наступний вираз:

$$dQ_p = \beta k_0 \mu_0 C_0 f Q \frac{R^2}{E^2} 273^2 \frac{\pi d^2}{4} \bar{C} \bar{\mu} \frac{1}{\Theta^2} e^{-1/\Theta} dx \quad (2.4)$$

В такому випадку витрата теплоти на нагрівання суміші буде становити:

$$dQ_n = V_{cm} c_{cm} \frac{dT}{dx} dx, \quad (2.5)$$

де V_{cm} — секундна витрата суміші; c_{cm} — теплоємність суміші, c_n — теплоємність повітря; c_d — теплоємність деревинних частинок; W — швидкість, при 0°C.

Секундна витрата суміші визначається:

$$V_{cm} = W \frac{\pi d^2}{4} \frac{273}{T} = W_0 \frac{\pi d^2}{4}$$

Теплоємність суміші:

$$c_{cm} = (c_n + \mu_0 c_z)$$

Виконавши підстановку у рівняння (2.5) вираз теплоємності суміші, перейшовши до вигляду безрозмірної температури:

$$dQ_n = \frac{E}{R} W_0 (c_n + \mu_0 c_z) \frac{\pi d^2}{4} \frac{d\Theta}{dx} dx \quad (2.6)$$

Перейшовши до безрозмірних температур, величину відведеної теплоти в камері довжиною dx визначається за формулою:

$$dQ_T = \alpha_c \frac{E}{R} (\Theta - \Theta_1) \pi d dx. \quad (2.7)$$

де α_c – коефіцієнт тепловіддачі через стінки в камері згорання, кВт/(м²*К);
 Θ_1 – температура стінок камери, К.

Після математичних перетворень та підстановки отримаємо математичний вираз теплового балансу реагуючої суміші вирази в безрозмірному вигляді:

$$\bar{C} \bar{\mu} \frac{1}{\Theta^2} e^{-\chi/\Theta} - \frac{d\Theta}{d\chi} - \Omega (\Theta - \Theta_1) = 0, \quad (2.8)$$

Друге диференціальне рівняння виведемо з рівняння матеріального балансу:

$$\frac{d}{dx} \left(W \frac{\pi d^2}{4} C \right) = K_z^{O_2} \mu_f \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2.10)$$

Виконаємо математичні перетворення приведемо рівняння балансу в безрозмірному вигляді:

$$\frac{d\bar{C}}{d\chi} = \frac{1}{\Theta_{a0}} \bar{C} \bar{\mu} \frac{1}{\Theta^2} e^{-\frac{\chi}{\Theta}}, \quad (2.11)$$

Для проведення математичного моделювання процесу самозапалювання виведемо третє диференціальне рівняння, що встановлює зв'язок між пропорційною кількістю витрати частинок деревини та кисню під час спалювання. Цей зв'язок має вид у безрозмірному стані:

$$\bar{\mu} = 1 - \alpha(1 - \bar{C}) \quad (2.12)$$

Система диференціальних рівнянь процесу спалювання подрібненої деревної біомаси в паливній камері у безрозмірному вигляді представлена рівняннями:

$$\begin{aligned} \bar{C} \bar{\mu} \frac{1}{\Theta^2} e^{-\frac{\chi}{\Theta}} - \frac{d\Theta}{d\chi} - \Omega(\Theta - \Theta_1) &= 0, \\ \frac{d\bar{C}}{d\chi} &= \frac{1}{\Theta_{a0}} \bar{C} \bar{\mu} \frac{1}{\Theta^2} e^{-\frac{\chi}{\Theta}}, \\ \bar{\mu} &= 1 - \alpha(1 - \bar{C}) \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.2 Дослідження самозаймання з урахуванням процесу тепловідведення

У процесі розвитку самозапалювання витрати кисню та деревних частинок залишаються незначними. За таких умов система диференціальних рівнянь (2.12) спрощується:

$$\frac{1}{\Theta^2} e^{-\frac{\chi}{\Theta}} - \frac{d\Theta}{d\chi} - \Omega(\Theta - \Theta_1) = 0 \quad (2.13)$$

Це рівняння, не містячи параметрів і констант, що описують специфічні властивості палива, є універсальним. Воно придатне для аналізу процесів самозаймання палива різних типів із урахуванням тепловідведення через стінки камери.

Реакцію між паливною сумішшю і окиснювачем розглядаємо як реакцію другого порядку. При цьому у фазі займання витрати горючих газів і кисню можна знехтувати. Для елементарного об'єму камери рівняння теплового балансу в розгорнутому вигляді має вигляд:

$$k_0 e^{-E/RT} C_z^0 C_{O_2}^0 \left(\frac{273}{T} \right)^2 Q \frac{\pi d^2}{4} dx - W \frac{\pi d^2}{4} \frac{273}{T} c_{sm} \frac{dT}{dx} dx - \pi d \alpha (T - T_1) dx = 0, \quad (2.14)$$

Перейшовши до безрозмірних параметрів температури, координат і коефіцієнта тепловіддачі з урахуванням впливу тепловідведення, рівняння можна записати:

$$k_0 e^{-E/RT} C_z^0 C_{O_2}^0 \left(\frac{273}{T} \right)^2 Q - \varpi_0 c_{sm} \frac{dT}{dx} - \frac{4\alpha}{d} (T - T_1) = 0, \quad (2.15)$$

У разі адіабатичних умов (коли $\Omega=0$), рівняння набуває вигляду:

$$\frac{d\Theta}{d\chi} = \frac{1}{\Theta^2} e^{-1/\Theta}. \quad (2.16)$$

Розв'язок цього рівняння у безрозмірних координатах:

$$\Theta = \Theta(\chi, \Theta_1), \quad (2.17)$$

Такий підхід дозволяє дослідити нестационарний процес самозаймання за різних режимних умов.

Рівняння (2.16) простіше розв'язувати чисельним методом із використанням комп'ютерного моделювання.

2.3 Дослідження неізотермічного методу для визначення кінетичних параметрів біомаси

Кінетика процесів у гомогенних системах піддається значному дослідженню, проте кінетичні закономірності гетерогенних процесів залишаються недостатньо вивченими.

Зокрема, топохімічні реакції, які належать до гетерогенних процесів, найчастіше досліджуються за ізотермічних умов, що створює певні труднощі через складність виконання таких експериментів.

Прогрес дослідження гетерогенних реакцій дозволив ширше впроваджувати неізотермічні методи, серед яких провідне місце займають термогравіметрія (TG), диференційна термогравіметрія (DTG) та диференційний термічний аналіз (DTA).

Одним із найінформативніших підходів для вивчення процесу спалювання деревної біомаси є метод диференційної термогравіметрії. Цей метод базується на безперервному зважуванні зразка палива під час його нагрівання. Він дозволяє оцінювати термохімічні перетворення матеріалу через низку параметрів і кількісно визначати кінетичні характеристики термічного розкладання.

Суть неізотермічного підходу полягає у фіксації дериватографом зміни маси та її похідної за умов лінійного підвищення температури зразка, поміщеного в тигель.

При дослідженні термоокисної деструкції деревної біомаси з використанням методу динамічного термогравіметричного аналізу кінетика процесу зазвичай описується за допомогою наступного рівняння:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k * (1 - \alpha)^n, \quad (2.18)$$

де α — ступінь перетворення, $k(T)$ — швидкісна константа, що залежить від температури, а $f(\alpha)$ — функція, що враховує механізм реакції.

Цей підхід забезпечує глибше розуміння термохімічних властивостей деревної біомаси та дозволяє точно визначати кінетичні константи процесів, що протікають під час її спалювання.

Швидкісна константа реакції описується за допомогою рівняння:

$$k = z * e^{-\frac{E}{RT}} \quad (2.19)$$

де z — передекспоненційний множник, а E — енергія активації.

Підставляючи рівняння (2.19) у вираз (2.18), отримаємо:

$$\frac{d\alpha}{dt} = z * e^{-\frac{E}{RT}} * (1 - \alpha)^n \quad (2.20)$$

Для спрощення аналізу експериментальних кривих ступінь розкладу α можна виразити через масову втрату W при розрахунковій температурі за певний інтервал часу та загальну масову втрату наприкінці реакції W_k .

Тоді рівняння (2.20) набуває вигляду:

$$\frac{d\left(\frac{W}{W_k}\right)}{dt} = z * e^{-\frac{E}{RT}} * \left(1 - \frac{W}{W_k}\right)^n \quad (2.21)$$

Запровадимо параметр q , який описує швидкість зміни температури у часі:

$$q = \frac{dT}{dt} \quad (2.22)$$

Таким чином, головне кінетичне рівняння термоокисної деструкції з урахуванням (2.22) перетворюється на:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{z}{q} * \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) * (1 - \alpha)^n \quad (2.23)$$

У запропонованому варіанті розрахунку найбільші труднощі виникають під час визначення всіх трьох параметрів одночасно, але цю обставину можна подолати, застосовуючи метод найменших квадратів. Тоді рівняння можна представити лінійним рівнянням:

$$\Omega = ax + by + c. \quad (2.24)$$

Представивши змінні та постійні в рівнянні (2.24), отримаємо:

$$x = \frac{1}{T} * 10^3; \quad y = \ln\left(\frac{W_k - W}{W_k}\right); \quad \Omega = \ln \frac{dW}{W_k dT};$$

$$a = \frac{-E}{R}; \quad b = n; \quad c = \ln \frac{z}{q}.$$

Тоді система рівнянь методу найменших квадратів матиме вид:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^N x_i^2 + b \sum_{i=1}^N x_i y_i + c \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N x_i D_i; \\ a \sum_{i=1}^N x_i y_i + b \sum_{i=1}^N y_i^2 + c \sum_{i=1}^N y_i = \sum_{i=1}^N y_i D_i; \\ a \sum_{i=1}^N x_i + b \sum_{i=1}^N y_i + cN = \sum_{i=1}^N D_i. \end{cases} \quad (2.25)$$

Висновки до розділу 2

У цьому розділі представлено основи методики обчислення кінетичних параметрів, зокрема енергії активації та передекспоненційного множника, для процесів термічного розкладання деревної біомаси. Методика базується на модифікованому кінетичному рівнянні та рівняннях, виведених із використанням методу найменших квадратів. Використання запропонованого підходу дозволяє на основі експериментальних даних визначити точні значення кінетичних констант, що описують процеси термічного розкладання біомаси. Це, у свою чергу, забезпечує можливість коректного моделювання механізму розкладу деревини та сумішей, створених на її основі.

Розроблена методика інтегрує теоретичні основи хімічної кінетики з практичними аспектами термічного аналізу біомаси. Завдяки впровадженню математичного моделювання та статистичних методів, зокрема методу найменших квадратів, методика забезпечує високу точність визначення основних кінетичних параметрів. Значущість цих параметрів полягає в їхній фундаментальній ролі в розумінні та прогнозуванні поведінки деревної біомаси під час термічного розкладання, що є критично важливим для різноманітних промислових застосувань та дослідницьких цілей.

Практична цінність цієї методологічної бази проявляється в її здатності надавати надійні дані для оптимізації процесів та проектування систем термічного перетворення. Точність визначення кінетичних констант безпосередньо впливає на достовірність прогностичних моделей, тим самим поглиблюючи наше розуміння механізмів розкладання та уможливлючи більш ефективне використання матеріалів на основі деревини в різних технологічних процесах.

РОЗДІЛ 3

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ

Вивчення процесів термічного перетворення деревної біомаси потребує комплексного застосування принципів хімічної термодинаміки та кінетики. Термодинамічний аналіз забезпечує розрахунок теплових ефектів реакцій та оцінку термодинамічної ймовірності їх перебігу, включаючи визначення рівноважного стану. Такий аналіз базується на термодинамічних характеристиках компонентів реакційної системи у вихідному та кінцевому станах. Проте для практичного застосування критично важливим є розуміння не лише принципової можливості реакції, але й динаміки її розвитку. Саме цей аспект досліджується методами хімічної кінетики.

Особливість кінетичних досліджень полягає в необхідності встановлення повного механізму реакції, включаючи проміжні стадії, що значно ускладнює процес порівняно з термодинамічними розрахунками. Встановлення кінетичної моделі та визначення її параметрів дозволяє прогнозувати швидкість процесу та оптимізувати умови його проведення в промислових установках.

Розробка математичної моделі процесу термічної конверсії деревини вимагає проведення комплексу експериментальних досліджень, що включають:

1. визначення елементного складу та теплофізичних властивостей деревної біомаси різних видів, з особливою увагою до швидкоростучих порід;
2. проведення комплексного термогравіметричного аналізу зразків деревного біопалива;

3. експериментальне дослідження кінетики термічної деструкції біомаси з подальшим визначенням кінетичних параметрів процесу.

3.1 Експериментальне обладнання для дослідження кінетичних параметрів процесу горіння

Визначення кінетичних параметрів термічного розкладання подрібненої деревної біомаси проводилось із використанням комплексного термоаналітичного обладнання - дериватографів конструкції Paulik-Erdey. Цей багатофункціональний прилад забезпечує синхронну реєстрацію термогравіметричних та калориметричних характеристик зразка в процесі програмованого нагріву.

Система реєстрації приладу забезпечує одночасне вимірювання наступних параметрів:

- динаміки температури зразка (T);
- зміни маси досліджуваного матеріалу як функції температури (ТГ крива);
- швидкості втрати маси зразка (ДТГ крива);
- теплових ефектів фізико-хімічних перетворень (ДТА крива).

Конструктивні особливості дериватографів дозволяють досліджувати матеріали різного агрегатного стану (тверді та рідкі) у широкому діапазоні мас зразків - від 5 до 1000 мг. Зразки можуть бути представлені у вигляді порошків, гранул або рідин.

В процесі термічного аналізу при контрольованому нагріві зразка здійснюється безперервна реєстрація наступних параметрів:

- втрати маси (ТГ), що відображає процеси виділення летких компонентів або перебіг хімічних реакцій з утворенням газоподібних продуктів;

- теплових ефектів (ДТА), пов'язаних з фазовими переходами різної природи (поліморфні перетворення, плавлення, випаровування), процесами адсорбції/десорбції та хімічними реакціями.

Технічні характеристики дериватографа Q-1500 D включають:

- температурний діапазон досліджень: від кімнатної температури до 1000-1500°C;
- регульована швидкість нагріву в межах 0.6-20 K/хв;
- чутливість вагової системи: 0.1 мг при діапазоні вимірювання 20-2000 мг;
- можливість проведення аналізу як в повітряному середовищі, так і в атмосфері інертного газу.

Система автоматичної реєстрації забезпечує безперервний запис термогравіметричної кривої (ТГ), що відображає зміну маси зразка, та кривої диференційного термічного аналізу (ДТА), яка характеризує різницю температур між досліджуваним зразком та еталоном.

Конструктивна схема дериватографа Q-1500 D системи Paulik-Paulik-Erdey представлена на рисунку 3.1. Ключовим елементом приладу є аналітичні терези (4), оснащені керамічним тримачем (3) для розміщення зразків та еталону. Тримач обладнаний трьома заводськими каліброваними термопарами. Дві термопари призначені для встановлення тиглів із досліджуваними зразками (1), третя - для тигля з еталонною речовиною (2).

Прилад функціонує у двох режимах термометрії:

Простий режим: використовується одиночна термопара з тиглем для зразка;

Диференційний режим: задіяна диференційна термопара, що складається з двох термопар з паралельним з'єднанням однойменних полюсів. При цьому один тигель містить досліджуваний зразок, інший -

еталонну речовину.

Вибір робочого режиму здійснюється за допомогою комутаційного перемикача на фронтальній панелі приладу.

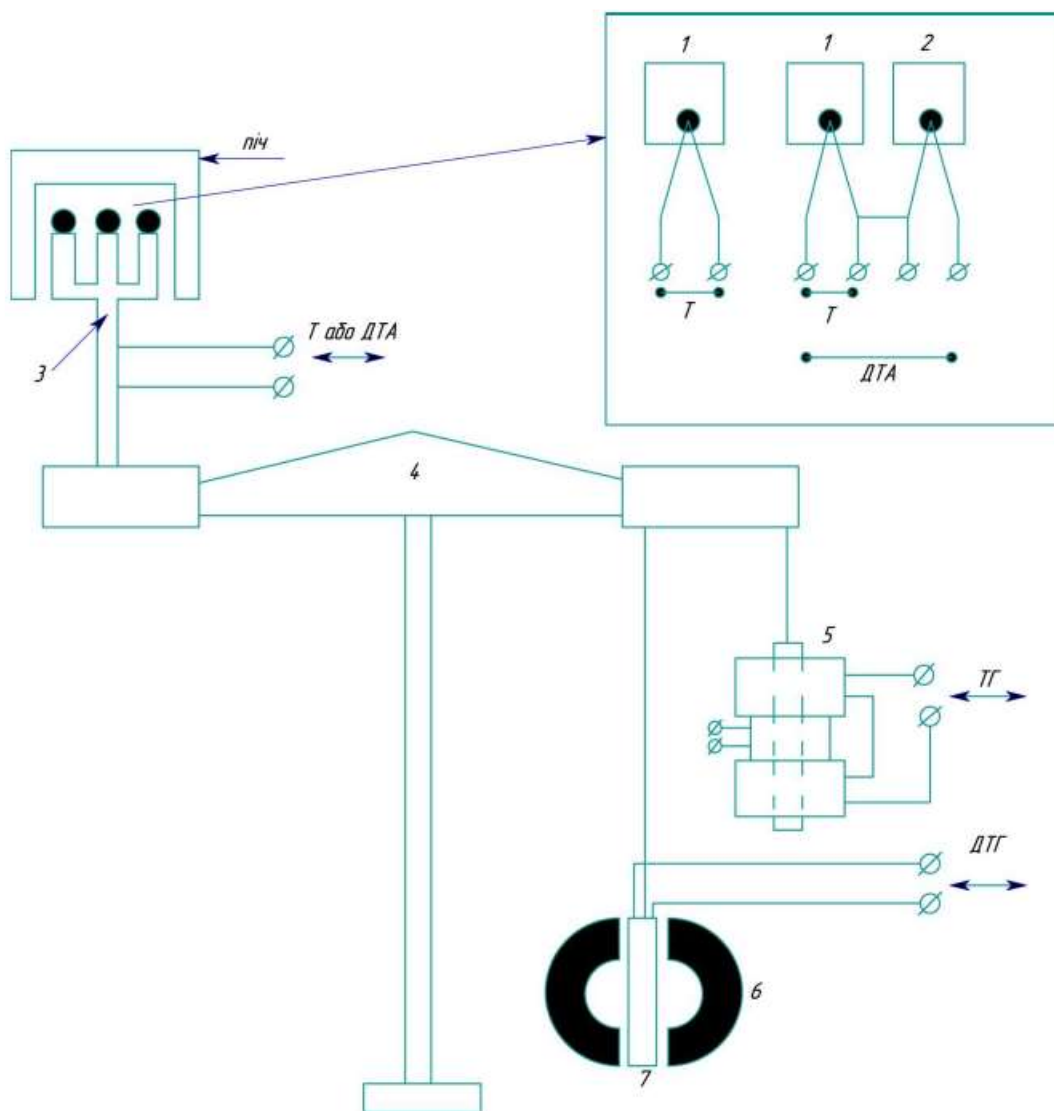


Рисунок 3.1. Конструктивна схема дериватографа Q-1500 D

На протилежному кінці коромисла в терезах встановлено вимірювальний комплекс, що базується на принципах електромагнітної індукції та забезпечує реєстрацію зміни маси зразка та швидкості цієї зміни.

Система реєстрації зміни маси реалізована на базі диференційного трансформатора (5), конструкція якого включає три коаксіально

розташовані котушки, зафіксовані на корпусі приладу. Рухомий металевий сердечник, з'єднаний з коромислом терезів, переміщується всередині котушкового блоку відповідно до зміни маси зразка. При подачі змінного струму на центральну котушку (первинна обмотка) в двох зовнішніх котушках (вторинна обмотка з диференціальним з'єднанням) індукується електрорушійна сила. У початковому положенні терезів, коли сердечник розташований симетрично відносно вторинних обмоток, результуюча напруга близька до нуля. Зміщення сердечника викликає пропорційну зміну вихідної напруги, що забезпечує високоточну електричну індикацію переміщення коромисла терезів.

Реєстрація швидкості зміни маси (крива DTG) здійснюється за допомогою магнітоіндукційного перетворювача, що складається з постійного магніту (6) та індукційної котушки (7). Котушка, підвішена до терезів, розміщується в однорідному магнітному полі постійного магніту. При зміні маси зразка відбувається переміщення котушки, що супроводжується генерацією індукційного струму, величина якого прямо пропорційна швидкості зміни маси.

Електричні сигнали від термопар, диференційного трансформатора та індукційної котушки через АЦП передаються на комп'ютер, забезпечуючи синхронну реєстрацію комплексу термоаналітичних кривих (рис. 3.2):

- температурної кривої (T);
- кривої диференційного термічного аналізу (DTA);
- термогравіметричної кривої (TG);
- кривої швидкості зміни маси (DTG).

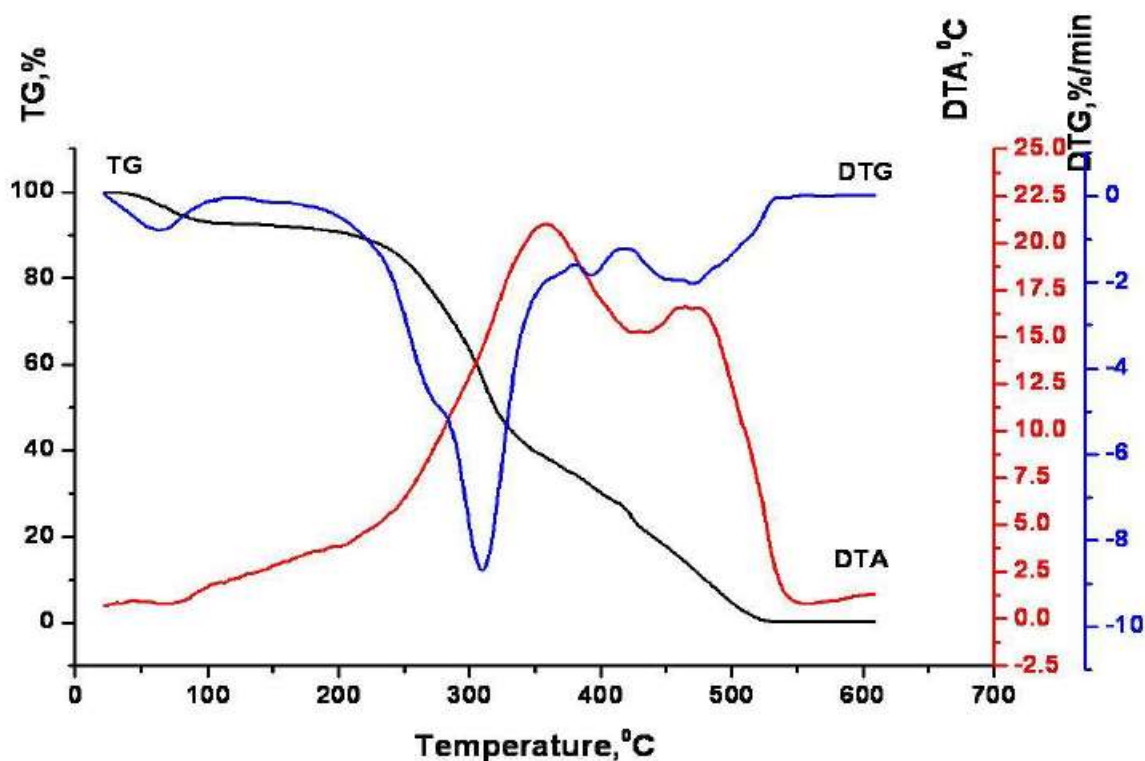


Рис 3.3. Термоаналітичне дослідження композитного зразка

Функціональні можливості дериватографа Q-1500 D забезпечують проведення термічного аналізу в двох режимах:

Динамічний режим - з програмованою зміною температури, що було описано вище.

Квазі-ізотермічний режим - призначений для дослідження кінетики термічного розкладання речовин за умов підтримання сталої температури. Цей режим є особливо інформативним при вивченні процесів термічної деструкції, що відбуваються при фіксованій температурі.

Застосування обох режимів аналізу дозволяє отримати комплексну інформацію про термічну поведінку досліджуваного матеріалу та механізми його розкладання в різних температурних умовах. Це має особливе значення при дослідженні складних композитних зразків, таких як комбінація кори та стовбурової деревини.

3.2 Методика встановлення хімічного складу зразків шляхом експерименту

Аналіз елементного складу матеріалу дозволяє встановити, які саме хімічні елементи формують досліджувану речовину та визначити їх кількісне співвідношення у відсотках. Варто зазначити, що цей метод не дає інформації про валентний стан елементів та характер хімічних зв'язків між ними.

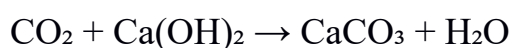
Деревина як природний матеріал містить низку ключових елементів, серед яких: С (вуглець), Н (водень), О (кисень), N (азот) та інші компоненти. Їх ідентифікація здійснюється різними методами.

Безпосередня детекція вуглецю можлива через термічну обробку зразка – при нагріванні органічний матеріал або згорає з утворенням кіптяви та слабким світінням, або зазнає карбонізації.

Для опосередкованого визначення вуглецю у формі CO_2 застосовують два підходи:

- спалювання горючих компонентів;
- термічна обробка негорючих сполук у присутності CuO .

В обох випадках утворений вуглекислий газ виявляють за допомогою Ca(OH)_2 :



Поява білої суспензії або осаду вказує на утворення карбонату кальцію.

При окисненні водню, що відбувається під час горіння або нагрівання з CuO , формується вода. Її присутність визначають індикаторним папером, просоченим CoCl_2 , який змінює забарвлення з синього на рожеве.

Наявність зв'язаних форм водню та кисню можна встановити за появою конденсату води під час термічної деструкції органічної речовини без доступу повітря (піролізу).

Кисень також можна виявити шляхом прожарювання зразка з магнієм, що супроводжується утворенням характерного білого оксиду магнію.

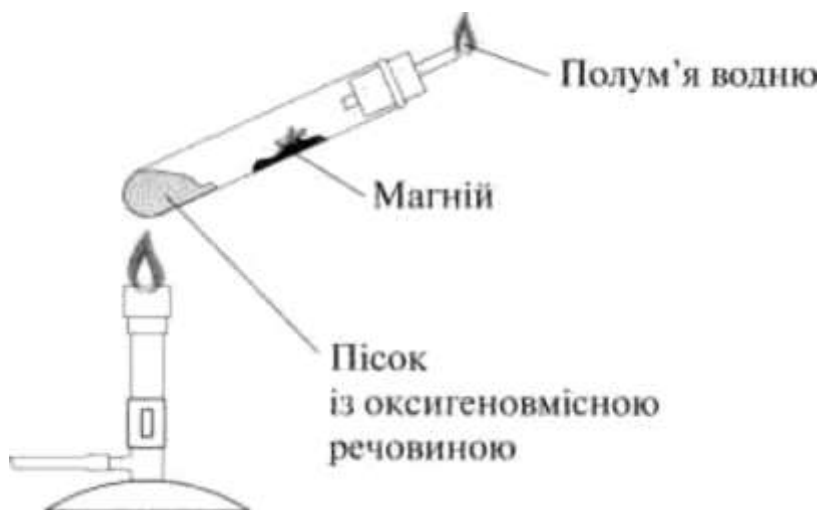
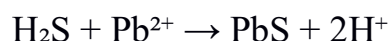


Рис. 3.3 – Визначення наявності азотовмісних сполук

Для детекції азотовмісних сполук, таких як аміни та амінокислоти, застосовують термічну обробку зразка в присутності суміші NaOH та CaO. При цьому виділяється амоніак, який можна ідентифікувати кількома способами: за характерним запахом, використовуючи зволожений індикаторний папір або за допомогою концентрованої HCl, що утворює білий "дим".

При дослідженні сірковмісних сполук їх нагрівають із натрій гідроксидом, внаслідок чого утворюється сірководень. Його присутність встановлюють через взаємодію з катіонами плюмбуму:



Характерною ознакою цієї реакції є формування чорного осаду

плюмбум (II) сульфід, що має низьку розчинність.

Використовуючи описану методологію елементного аналізу деревини та стандартизовані протоколи досліджень, було проведено комплексне вивчення хімічного складу деревних зразків. Отримані результати систематизовано в таблиці 3.1. Ці дані становлять основу для подальшого дослідження процесів горіння подрібненої деревної біомаси, що буде розглянуто в наступних розділах.

Таблиця 3.1. Хімічний склад деревних зразків

№ п/п	Назва деревинних матеріалів	C, %	H, %	S, %	O, %	N, %
Деревинні відходи						
1	Стовбурова деревина	52	6,2	0	42,7	0,6
2	Деревинно-шліфувальна пилюка	43,99	5,69	3,2...3,6	42,04	3,7
3	Стружка, опилки, тріска	51	6	0	43,8	0,6
Кора						
4	Сосна	60,16	8,82	5,66	28,40	
8	Береза	72,73	10,102	6,12	14,07	
9	Дуб	50,76	1,21	10,70	34,18	
10	Бук	45,18	6,31	10,69	40,85	
Дров'яна сировина						
21	Сосна (стовбурова)	49,57	6,11	0,037	34,2	1,0
24	Тополя (стовбурова)	52,15	5,79	0,04	30,1	0,87
25	Верба (однорічні пагони)	47,3	4,18	0	13,72	0,6
27	Верба (трирічні пагони)	55,75	4,72	0	8,01	0,36

3.3 Експериментальні методи визначення кінетичних параметрів горіння подрібненої деревної біомаси

Термічний аналіз представляє собою комплекс аналітичних методів, які широко використовуються для дослідження характеристик та композиції

матеріалів. В основі цих методів лежить вивчення взаємодії речовини з термічною енергією, при цьому різноманітні параметри системи вимірюються як функція температури.

Особливо важливе значення мають теплові ефекти, що супроводжують хімічні перетворення або виникають внаслідок них. Менш поширеними, але також значущими, є методи, що базуються на дослідженні теплових процесів під час фізичних змін речовини. До таких процесів належать поліморфні перетворення, фазові переходи та інші явища, пов'язані зі зміною міжмолекулярних взаємодій, включаючи процеси розчинення та розведення.

Серед методів термічного аналізу найбільш затребуваними є динамічна термогравіметрія (ТГ) та диференціальний термічний аналіз (ДТА). Під час досліджень зразок розміщують у спеціалізованій печі, де відбувається контрольоване підвищення температури. При термогравіметричному аналізі фіксується маса зразка (m), а при диференціальній термогравіметрії (ДТГ) - швидкість зміни маси (dm/dt) відносно температури (T).

Крива ДТА, яка відображає температурну різницю між досліджуваним зразком та інертним еталоном (зазвичай Al_2O_3), надає додаткову інформацію про термічні перетворення речовини. Для отримання таких даних використовують дериватограф. Застосування диференційної термопари, що з'єднує два тиглі, забезпечує точну реєстрацію ентальпійних змін у зразку. Екзотермічні та ендотермічні ефекти розрізняються за напрямком піків на кривій ДТА.

Хоча класичний метод ДТА дозволяє точно визначити температури переходів та їх характер, він має обмеження щодо отримання кількісних даних про зразок та теплоту перетворень. Це пов'язано з невизначеністю таких параметрів як питома теплоємність і теплопровідність зразка до та після переходу. Крім того, на площу піків впливають швидкість нагріву, розташування термопар та інші експериментальні умови.

Для отримання кількісних результатів використовують диференційний скануючий калориметр (ДСК) з ізотермічною коміркою, що перетворює прилад ДТА у диференційний калориметр. Цей метод називають диференційною скануючою калориметрією.

Термометричне титрування досліджує температурну залежність аналізованої системи від об'єму доданого титранту в адіабатичних умовах, де теплообмін із середовищем мінімальний. Процес автоматизований з використанням спеціальних бюреток, чутливих термопар і термісторів, а дані реєструються електронними приладами.

Ентальпієметричний метод базується на визначенні кількості речовини через температурні зміни, що відповідають варіаціям ентальпії (ΔH). При прямій інжекційній ентальпієметрії (ПІЕ) концентрований розчин реагенту вводиться в розчин проби в адіабатичному калориметрі. Зміна температури (ΔT) пропорційна виділеній теплоті згідно формули:

$$\Delta T = (n_0 \cdot \Delta H) / c_c$$

де c_c - теплоємність системи (кДж/К).

При відомій теплоємності системи K та стандартній ентальпії ΔH_0 , можна розрахувати кількість речовини за температурними змінами. Метод демонструє високу чутливість - наприклад, дозволяє визначити концентрацію нітрит-іона до $3 \cdot 10^{-9}$ моль/дм³ при його взаємодії з сульфаміновою кислотою.

Дилатометрія представляє собою термічний метод аналізу, що базується на вивченні температурної залежності лінійних та об'ємних параметрів речовини. Цей метод особливо ефективний для дослідження структурних трансформацій. При фазових переходах спостерігається зміна коефіцієнта лінійного розширення α , що призводить до пропорційної зміни розмірів $\Delta l = \alpha \cdot \Delta T$.

Основною сферою застосування дилатометрії є дослідження

полімерних матеріалів, де метод дозволяє вивчати теплове розширення, ступінь полімеризації та кристалічності. Додатково метод використовується для аналізу об'ємних змін розчинів та визначення точки еквівалентності при дилатометричному титруванні, де відслідковується зміна об'єму розчину ΔV або відповідної зміни довжини Δl відносно кількості доданого титранту.

Катарометрія є особливим методом термічного аналізу, що ґрунтується на вимірюванні теплопровідності газових сумішей залежно від їх складу. Присутність різних газоподібних компонентів у потоці змінює загальну теплопровідність суміші порівняно з чистим газом-носієм. Метод використовує нагріту нитку, розміщену в потоці газу, інтенсивність охолодження якої залежить від складу суміші. Цей метод широко використовується для аналізу промислових газових сумішей, зокрема для моніторингу атмосферних викидів промислових підприємств.

Дериватографія є комплексним методом термічного аналізу, який забезпечує одночасну реєстрацію та аналіз чотирьох параметрів: термогравіметричної кривої (ТГ), диференційної термогравіметричної кривої (ДТГ), диференційного термічного аналізу (ДТА) та температури зразка (Т). Для проведення таких досліджень використовують спеціалізовані прилади - дериватографи.

Дериватограф складається з таких основних вузлів:

- блок електроживлення
- програматор для контролю швидкості температурних змін
- система з двох циліндричних печей
- ваговий механізм
- шестиканальний реєстратор, з якого використовуються чотири

канали для запису даних

Результати вимірювань фіксуються у вигляді дериватограми, приклад якої наведено на рис. 3.4.

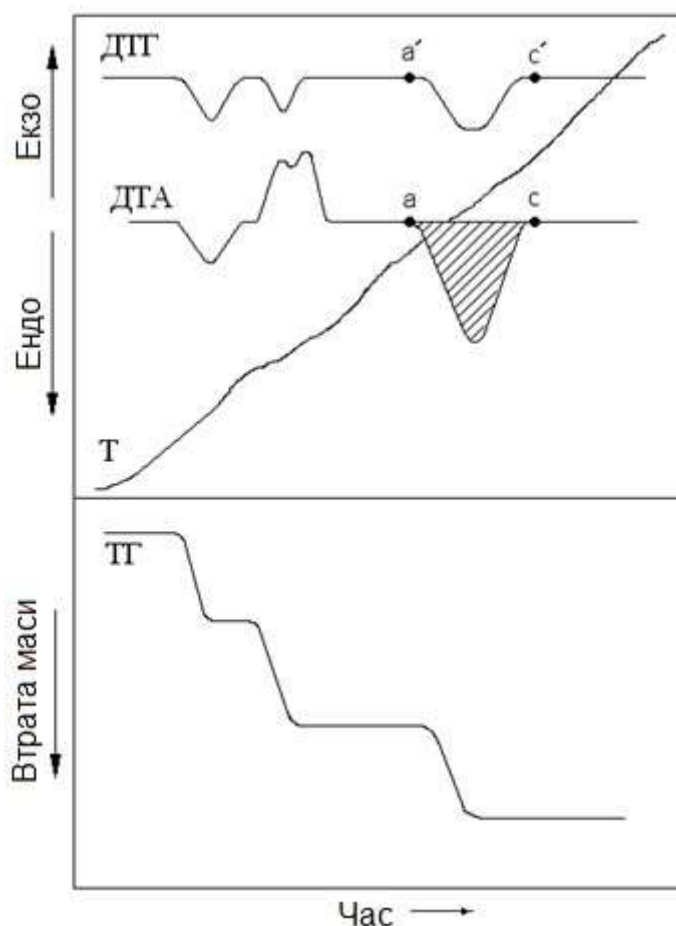


Рис. 3.4. Результати вимірювань дериватором

Температурна крива (Т) має переважно лінійний характер з незначними відхиленнями в зонах значних теплових ефектів у зразку. Калібрування температурної шкали здійснюється за допомогою спеціального калібрувального пристрою.

Крива ДТА відображає теплові ефекти процесів у зразку через відхилення від базової лінії: вгору для екзотермічних та вниз для ендотермічних процесів. Кількісну оцінку активної фази можна провести на основі зміни ентальпії зразка (ΔH) та температурного градієнта (ΔT) між зразком та еталоном (Al_2O_3):

$$m = \frac{g \cdot k}{\Delta H} \int_a^c \Delta T \cdot dT, \quad (3.1)$$

де m - маса активної речовини, k - теплопровідність проби, g - константа приладу. Інтеграл відповідає площі під піком кривої ДТА відносно базової лінії ас.

Для кількісного визначення маси активної речовини використовують порівняння з еталонним зразком відомої маси, вимірюваним за ідентичних умов:

$$\Delta H = \frac{m}{g \cdot k \cdot \int_a^c \Delta T \cdot dT} = \frac{m}{g \cdot k \cdot S}, \quad (\text{кДж/моль}). \quad (3.2)$$

де

$$m_1 = m_0 \frac{S_1}{S_0}.$$

де S_1/S_0 - відношення площ відповідних піків. При відсутності цифрової обробки дані отримують шляхом зважування вирізаних паперових копій піків. Точність методу становить 90-95%.

Термогравіметрична крива (ТГ) демонструє ступінчасту зміну маси зразка під час термічних перетворень. Для інтерпретації даних необхідно знати початкову масу активної речовини та максимальний діапазон вимірювань приладу. При стандартному калібруванні на 500 мг, відносна зміна маси розраховується як відношення висоти сходинки до повної шкали приладу, що дозволяє визначити частку втраченої маси при таких процесах як дегідратація чи термічний розклад.

3.4 Методика обробки експериментальних даних

Методика обробки експериментальних даних

Для визначення кінетичних параметрів існує широкий спектр методів, які класифікують на три основні категорії:

- диференціальні методи

- інтегральні методи
- методи зі змінною швидкістю нагрівання

Інтегральні методи, до яких належать методики Райха, Котса-Редферна та Джил-Грінхау [71, 83], базуються на застосуванні наближеного інтегрування рівняння швидкості реакції. Однак ці методи мають ряд суттєвих обмежень:

- потреба у проведенні мінімум двох термографічних досліджень одного зразка
- неможливість точного визначення порядку реакції
- висока температурна чутливість результатів

Подібні недоліки характерні і для методів, що використовують варіювання швидкості нагрівання.

Диференційні методи (вант Гоффа, Фрімена-Керрола, Дойля, Жако та інші використовують диференційну форму рівняння кінетики деструкції. Серед цієї групи найбільш універсальним та широко застосовуваним вважається метод Фрімена-Керрола, який базується на представленні експериментальних результатів у вигляді специфічної залежності.

$$\frac{\Delta \ln\left(\frac{d\alpha}{dT}\right)}{\Delta \ln(1-\alpha)} = n - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)}{\Delta \ln(1-\alpha)}, \quad (3.2)$$

Ступінь перетворення, позначений як α , і його швидкість зміни, $d\alpha/dT$, є ключовими параметрами. Залежність (3.2) можна представити як рівняння прямої, за допомогою якого визначають параметри: тангенс кута нахилу цієї прямої до осі абсцис відповідає величині $-E_a/R$, а перетин із віссю ординат дає значення $\ln(1-\alpha)$. Проте метод Фрімена-Керрола, як і інші аналогічні підходи, має певні обмеження. Серед них – велика кількість математичних операцій, що збільшують похибку, та можливість обчислення лише усереднених параметрів для усього процесу в заданому

температурному інтервалі. Особливо складно застосовувати цей метод для процесів зі складною або асиметричною формою ДТГ-кривої.

На дериватографі отримують залежності таких параметрів, як ДТА, ДТГ, ТГ та ТТТ, у вигляді функцій часу. Для аналізу цих даних будують графіки залежності параметрів від температури, використовуючи криву ТТТ, яка відображає зміну температури з часом. Температурну шкалу формують через точки перетину горизонтальних калібрувальних ліній температури та кривої ТТТ, після чого визначають ключові температури на кривих ДТА, ДТГ і ТГ, проектуючи характерні точки на вісь абсцис.

Втрату маси зразка, виражену у відсотках, обчислюють за ТГ-кривою, використовуючи сітку для оцінки. Визначають температуру початку термодеструкції (T_r) та температури, що відповідають різним етапам втрати маси.

Енергія активації E_a може бути визначена декількома методами, серед яких:

1. **Метод Фрімена-Керрола:** На крутій ділянці ТГ-кривої вибирають кілька точок (рис. 3.5), у кожній із яких визначають втрату маси G_i та обчислюють температурні швидкості розкладу ω_{Ti} . Швидкість розкладу відповідає тангенсу кута нахилу дотичної до кривої в певній точці, наприклад, для точки 1 (рис. 3.4).

2. **Метод подвійного логарифмування:**

Для обчислення енергії активації (E_a) за допомогою цього методу спочатку визначають температуру, за якої розпочинається деструкція зразка, а потім у певному інтервалі температур (зазвичай через кожні 10°C) фіксують втрату маси ΔG_i при відповідній температурі T . Відношення втрат маси для сусідніх інтервалів $\Delta G_i / \Delta G_{i+1}$ піддають подвійній логарифмізації.

Аналізуючи отримані результати, визначають тангенс кута нахилу прямої $\text{tg}\alpha$, побудованої за залежністю логарифмів. Після цього енергію активації E_a обчислюють за формулою:

$$E_a = R \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.3)$$

де R - універсальна газова стала, $R = 8,31 \text{ кДж/}(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Цей метод дозволяє отримати значення енергії активації для досліджуваних зразків.

Висновки до розділу 3

Проведено огляд і детальний аналіз методів термічного аналізу. На основі цього для виконання експериментальних досліджень було обрано метод дериватографії, який є одним із найпоширеніших підходів у термічному аналізі. Його перевагою є можливість одночасного отримання та інтерпретації кривих отриманих від дериватора.

Особливу увагу під час застосування цього методу слід приділяти умовам проведення експерименту, зокрема швидкості нагрівання зразків, оскільки цей параметр суттєво впливає на можливість порівняльного аналізу і точність результатів різних досліджень.

Метод дериватографії буде використано для визначення кінетичних параметрів в процесі спалювання дослідних зразків (подрібненої деревної біомаси).

РОЗДІЛ 4

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ПОДРІБНЕНОЇ БІОМАСИ

4.1 Визначення закономірностей процесу горіння деревної біомаси

Вивчення ключових теплофізичних властивостей обробленої деревної біомаси виконувалося на дослідній установці за методикою базового та диференційного термометричного аналізу, а також методом термогравіметричного аналізу. Опис можливостей установки та методику досліджень детально представлено в попередньому розділі.

Дослідні термограми зразків та підсумкові дані їхньої обробки наведені на рисунку та таблицях нижче.

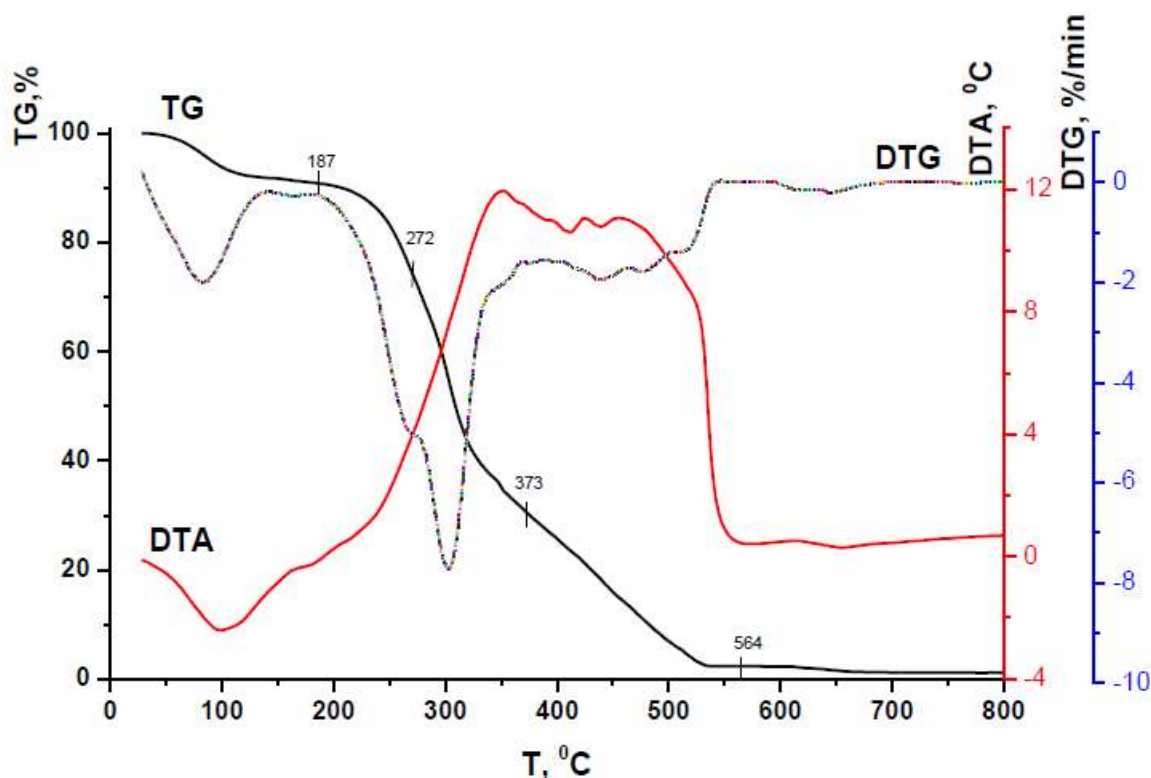


Рис. 4.1. Термограма теплофізичних властивостей стовбура з корою

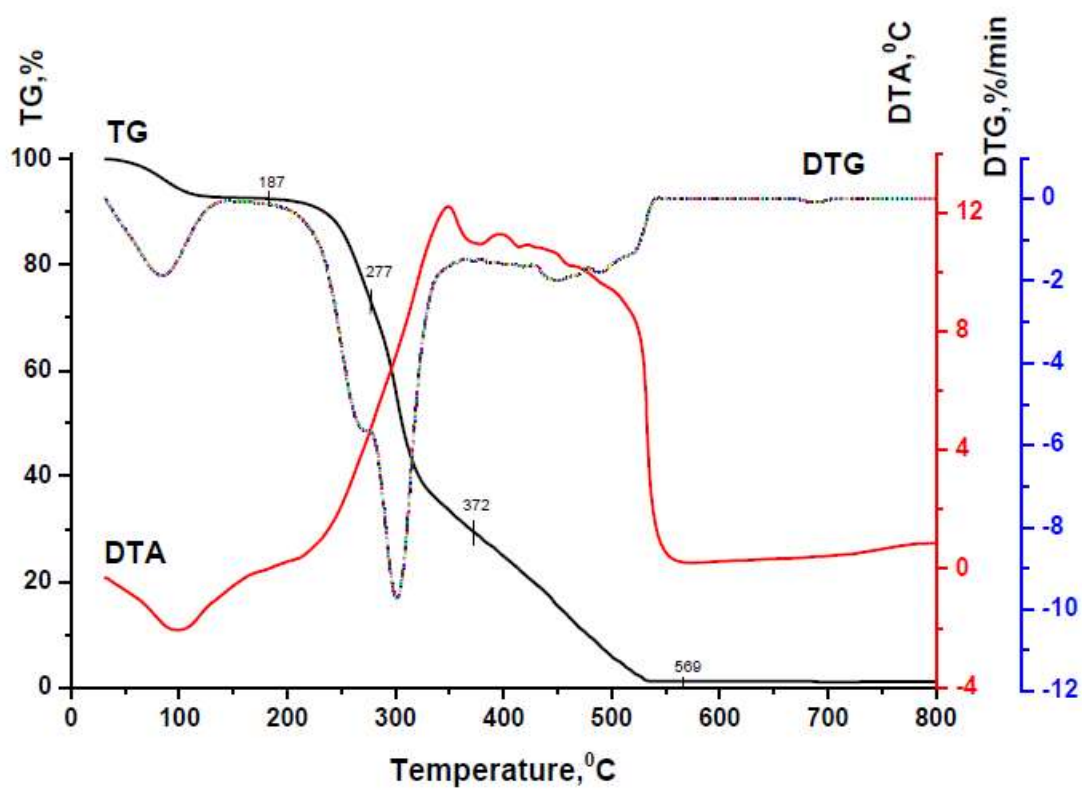


Рис. 4.2. Термограма теплофізичних властивостей стовбура

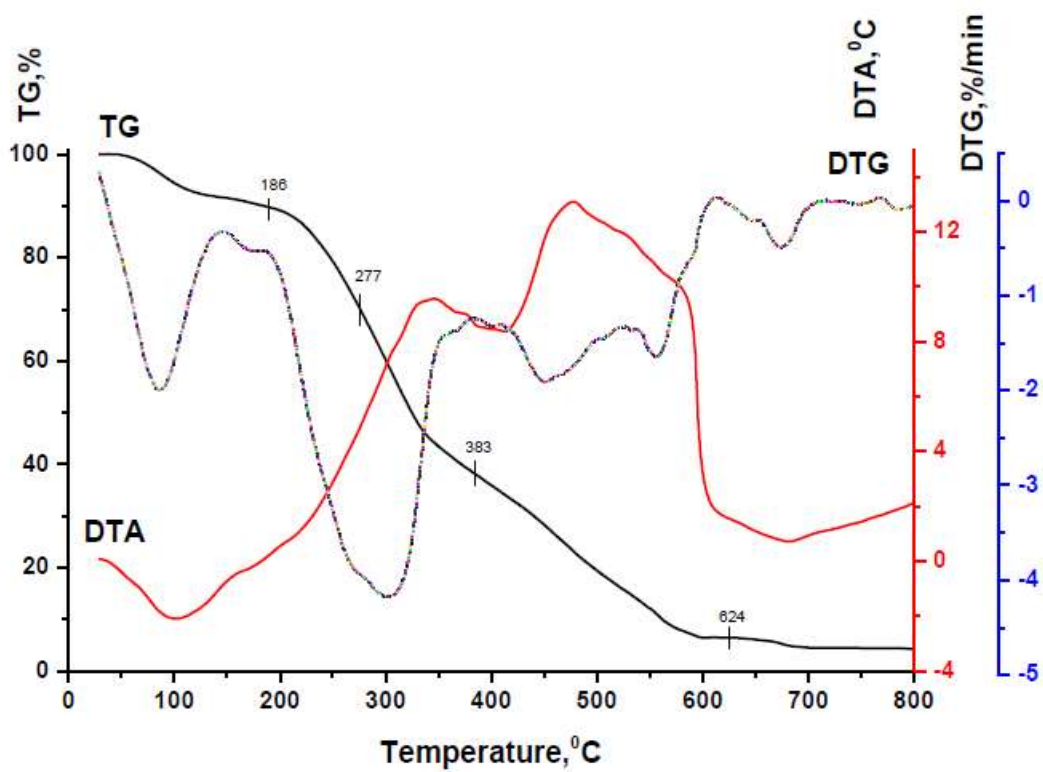


Рис. 4.3. Термограма теплофізичних властивостей кори

Таблиця 4.1 Результати комбінованого аналізу зразків Вербі

Дослідний зразок	Експеримент	Температура початку та кінця розкладу, °C	Втрати маси, %
Стовбур верби з корою	1	21 – 189	7,7
	2	188 – 288	19,7
	3	288 – 382	43,7
	4	383 – 570	28,8
Стовбур верби	1	21 – 189	9,3
	2	188 – 282	17,7
	3	282 – 383	43,3
	4	384 – 565	28,4
Кора верби	1	21 – 188	10
	2	186 – 288	20,6
	3	288 – 383	31,5
	4	384 – 625	32

На першій стадії (21–188 °C) проходять ендотермічні процеси, зумовлені випаровуванням хімічно незв'язаної та конституційної води. Значна втрата маси зразків спостерігається на кривих TG при температурі понад 200 °C.

На другій стадії термолізу, яка згідно з даними диференційного термогравіметричного аналізу охоплює діапазон температур 187–288 °C, одночасно відбуваються кілька процесів:

- Ендотермічні дегідратація та піроліз, які включають відщеплення летких продуктів деструкції та зменшення ступеня полімеризації целюлози.
- Екзотермічні термоокисні деструктивні реакції, що підтверджується поведінкою кривої DTA зразків верби *Salix* (рис. 4.1–4.3).

Особливістю зразка 3 є найбільш інтенсивна втрата маси на цій стадії (рис. 4.4), що вказує на активніші процеси відщеплення летких продуктів розкладу саме у зразку кори.

На третій стадії термолізу (288–384 °C) спостерігається найбільша втрата маси зразків (табл. 4.1), а також виражений екзотермічний ефект на кривих DTA. У цьому температурному діапазоні розвиваються активні

термоокисні деструктивні процеси, супроводжувані полуменевим горінням летких продуктів.

Для зразка 3 термоокисні процеси у повітряній фазі менш інтенсивні, що відображається у меншій втраті маси та слабшому екзотермічному ефекті на кривій DTA порівняно з іншими зразками.

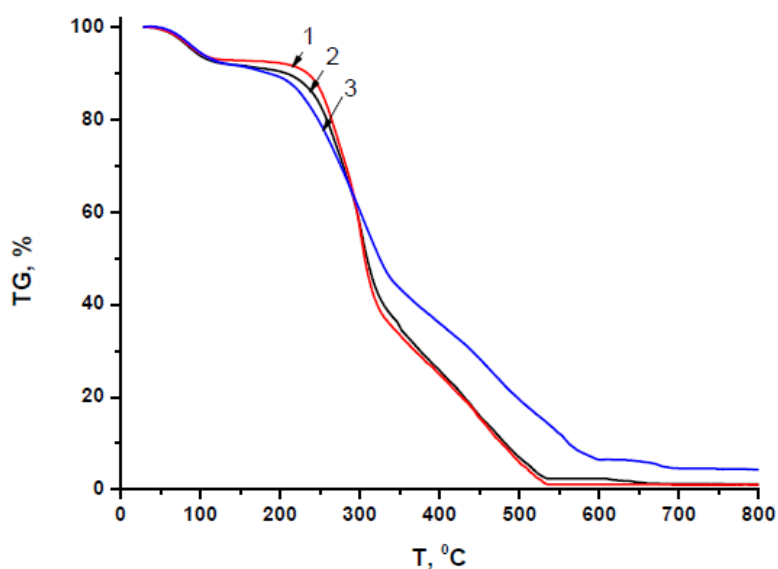


Рис. 4.4 - Втрата маси визначена термогравіметричним методом

1-Стовбур верби з корою; 2 -Стовбур верби; 3-Кора верби

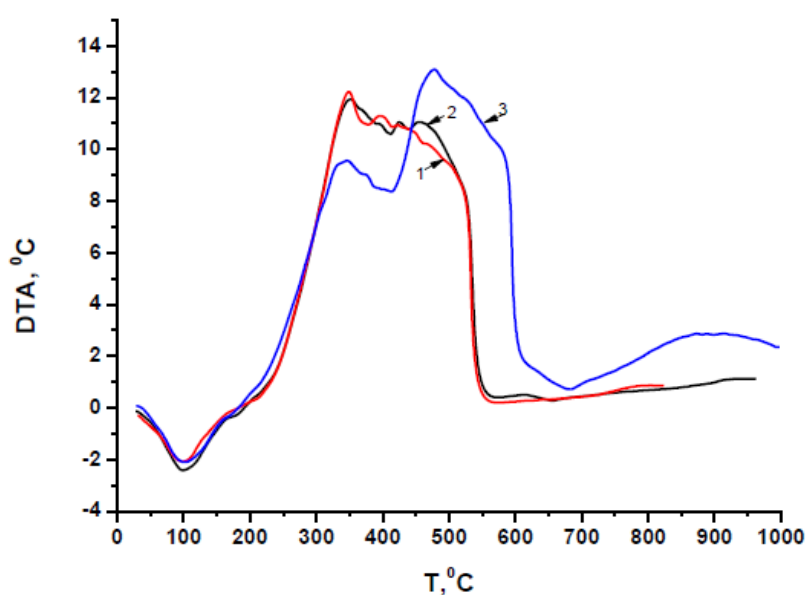


Рис. 4.5 - Температура горіння зразків при екзотермічному ефекті

1-Стовбур верби з корою; 2 -Стовбур верби; 3-Кора верби

На четвертій стадії термолізу (382–625 °С) відбувається процес вигорання карбонізованого залишку зразків верби. Для зразка 3, який демонструє найбільший вміст коксового залишку, гетерогенне окислення проходить з максимальною інтенсивністю. Це підтверджується найяскравішим екзотермічним ефектом на кривій DTA, який, порівняно з іншими зразками, зміщується в область вищих температур.

Як свідчать результати термічного аналізу, зразок кори володіє найбільшою теплотворною здатністю. Процеси термоокисної деструкції та вигорання карбонізованого залишку супроводжуються найсильнішим екзотермічним ефектом, що відображено на кривій DTA.

На рисунку 4.6 зображена термограма зразків однорічної верби.

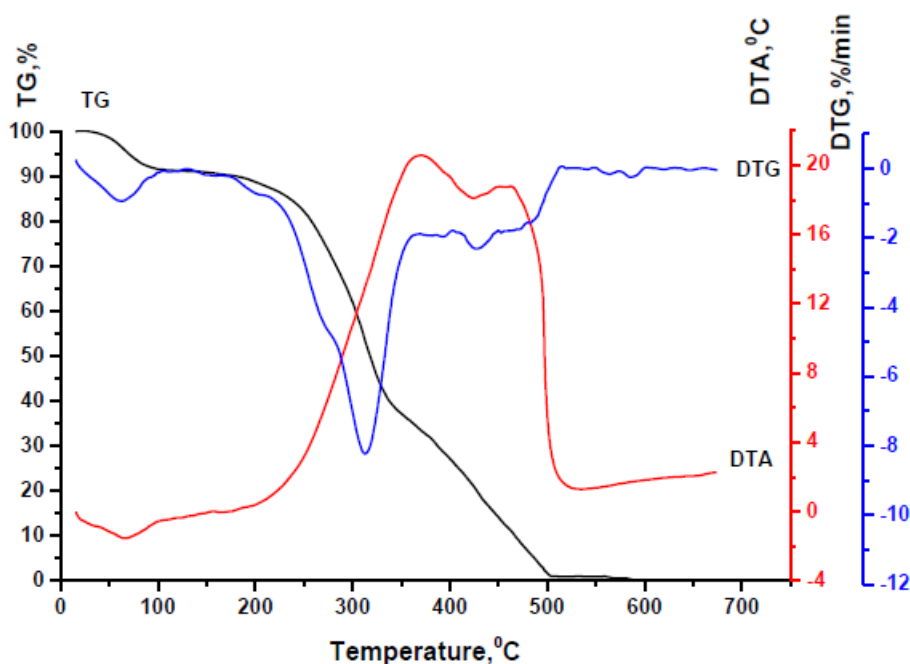


Рис. 4.6. Термограма зразків однорічної верби

На першій стадії термолізу зразків 1 і 3, яка відбувається в температурному діапазоні 20–170 °С, проходять ендотермічні процеси,

пов'язані з випаровуванням хімічно незв'язаної та конституційної води, що призводить до втрати маси приблизно на 10%.

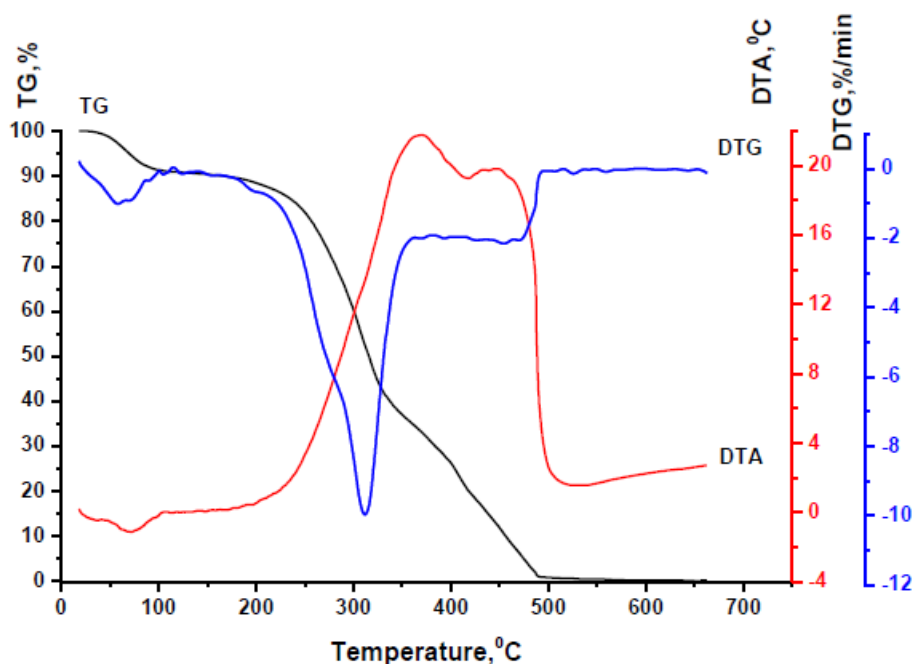


Рис. 4.7. Термограма зразків трирічної верби

На другій стадії термолізу, згідно з даними диференційного термогравіметричного аналізу, яка протікає в температурному інтервалі 180–280 °C, поряд із дегідратацією та піролізом, що супроводжується відщепленням летких продуктів деструкції (з втратою маси близько 20%), спостерігається різке зниження ступеня полімеризації целюлози. На цій стадії також розвиваються екзотермічні термоокисні деструктивні процеси, про що свідчить хід кривої DTA досліджуваних зразків верби.

На третій фазі термолізу (270 – 415 °C), що характеризується найбільшими втратами маси у зразках верби *Salix Viminalis* та виникненням виразного екзотермічного ефекту на кривих DTA, відбуваються інтенсивні термоокисні деструкційні процеси, що супроводжуються полумневим горінням летких продуктів розкладу. Втрата маси зразка 1 на цій стадії складає 39%, а зразка 3 – 40%.

На четвертому етапі термолізу, який для зразка 1 проходить у діапазоні температур 416 – 517 °С, а для зразка 3 – у межах 416 – 505 °С, відбувається повне згорання карбонізованого залишку.

Процеси полуменевого горіння та вигорання карбонізованих залишків у зразку 3 відбуваються інтенсивніше, ніж у зразку 1. Це підтверджується більшою втратою маси трирічного зразка верби *Salix Viminalis* на третій та четвертій фазах термолізу, що супроводжується появою значно більш потужних екзотермічних ефектів на кривій DTA цього зразка порівняно з однорічним зразком (рис. 4.8).

Отримані результати можуть бути пояснені відмінностями в елементному складі зразків 1 і 3 (табл.3.1). Зразок 3 містить більшу кількість вуглецю $C = 55,75 \%$.

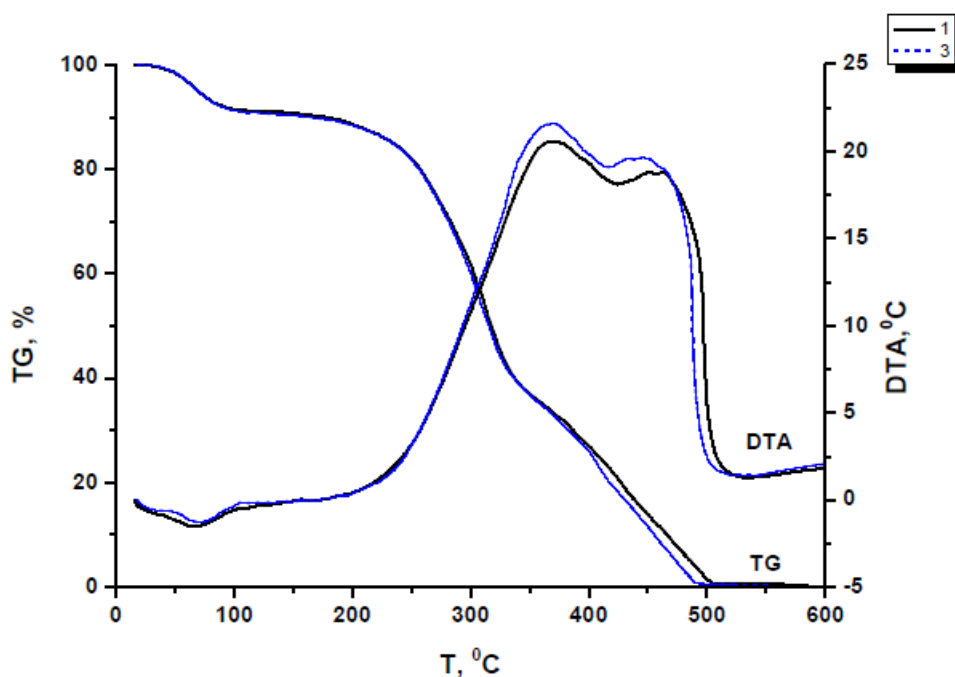


Рисунок 4.8 – Порівняння характеристик зразка при протіканні процесу термолізу

За результатами проведених експериментальних досліджень визначено якісний вплив віку та ступеня подрібнення верби енергетичної на процес її горіння, а також сформовано основу для визначення кінетичних констант процесу спалювання різних сортів подрібненої деревини. У цьому розділі надано результати досліджень процесу самозаймання деревини верби

4.2 Аналіз експериментальних досліджень процесу спалювання деревної біомаси

Для визначення кінетичних параметрів процесу спалювання використовуються криві втрати маси та кінетичне рівняння наступного виду з розділу 2:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = K * (1 - \alpha)^n = k_0 * \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) * (1 - \alpha)^n,$$

Якщо не враховувати зміну температури в часі та прологарифмувати, цей вираз можна подати у вигляді:

$$\ln\left[\frac{d\alpha}{d\tau}\right] = \ln k_0 - \frac{E}{RT} + n * \ln(1 - \alpha)$$

Який можна представити у вигляді лінійної залежності:

$$\Omega = ax + by + c$$

де:

$$\Omega = \ln\left(\frac{d\alpha}{d\tau}\right) = \ln\left(\frac{dW}{d\tau} * \frac{1}{W_k}\right)$$

$$a = \frac{-E}{R}; b=n; x = \frac{1}{T}; y = \ln\left(1 - \frac{W}{W_k}\right); c=\ln k_0.$$

Величину $d\alpha/d\tau$ можна знайти аналітично, використовуючи інтерполяцію кривої втрати маси поліномом другого порядку. З кривої втрати маси для зразка верби *Salix* отримуємо залежність втрати маси від часу, яка наведена у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Залежність втрати маси від часу

$\tau \cdot 10^{-2}$ сек	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
$W \cdot 10^6$ мг	2,33	2,66	3	3,66	6,97	7,66	11,66	12,43

Система рівнянь для знаходження коефіцієнтів інтерпольованої кривої втрати маси поліномом виду $y = ax^2 + bx + c$ має вигляд:

$$\begin{cases} (\sum x^4) * a + (\sum x^3) * b + (\sum x^2) * c = \sum (x^2 * y) \\ (\sum x^3) * a + (\sum x^2) * b + (\sum x) * c = \sum (x * y) \\ (\sum x^2) * a + (\sum x) * b + m * c = \sum y \end{cases}$$

де m — кількість точок в наборі експериментальних даних (в даному випадку вісім).

Розв'язуючи систему рівнянь для набору експериментальних значень залежності втрати маси від часу (див. таблицю 4.1), отримуємо:

$$a = 2,162 \cdot 10^{-2}; b = 3,4657; c = -14,1755.$$

Таким чином, аналітична залежність втрати маси від часу має вигляд:

$$W = 2,162 \cdot 10^{-2} \cdot \tau^2 + 3,4657 \cdot \tau - 14,1755.$$

Швидкість втрати маси для досліджуваного зразка деревини виражається таким рівнянням:

$$\frac{dW}{d\tau} = 0,04324 * \tau + 3,4657.$$

Однак, для отримання значень кінетичних констант на основі залежності втрати маси від температури, доцільно застосувати кінетичне рівняння для обчислення кінетичних констант.

Використання системи рівнянь (2.25) на основі кривої втрати маси залежно від температури після математичних операцій дозволить отримати:

$$\begin{cases} 45,46 * 10^{-6} * a - 94,92 * 10^{-4} * b + 19,036 * 10^{-3} * c = -27,814 * 10^{-3} \\ -94,92 * 10^{-4} * a + 3,7523 * b - 4,1913 * c = 6,2401 \\ 19,036 * 10^{-3} * a - 4,1913 * b + 8 * c = -11,681 \end{cases}$$

Розв'язуючи дану систему, отримуємо значення:

- $E = -a \cdot R$ кДж/моль) — енергія активації;
- n — порядок реакції.

4.3 Аналіз експериментальних досліджень процесу самозагорання деревної біомаси

Вивчення процесу самозапалювання без врахування теплових втрат (вплив режимних факторів: концентрація реагентів, швидкість).

Для окремого зразка подрібненої деревної біомаси з відомим елементним складом коефіцієнт тепловіддачі Ω залежить від коефіцієнта надлишку повітря α (що визначає концентрацію кисню), а також від розміру деревинних частинок (які впливають на площу поверхні реагування). Тому в дослідженні були проаналізовані залежності за умов зміни двох вищезазначених параметрів:

$$\frac{1}{\theta^2} * e^{-\frac{1}{\theta}} = \frac{d\theta}{d\chi}$$

$$d\chi = \frac{d\theta}{\frac{1}{\theta^2 * e^{\frac{1}{\theta}}}}$$

$$\int_0^\chi d\chi = \int_{\theta_1}^\theta \theta^2 * e^{\frac{1}{\theta}} d\theta$$

. Зокрема, за змінних значень α в діапазоні від 1,0 до 4,0 були отримані відповідні залежності що зображені на рис. 4.9.

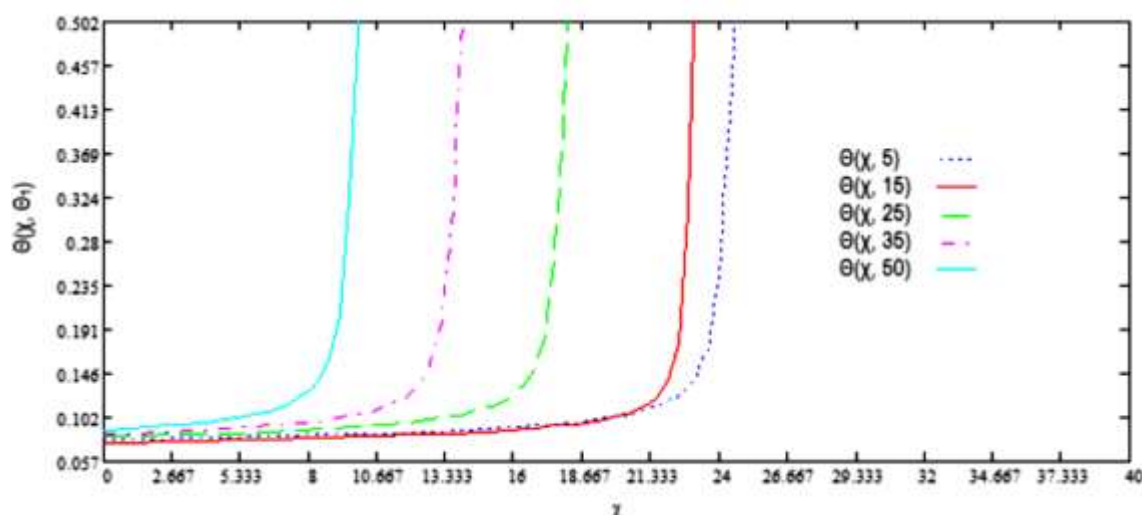


Рис. 4.9. Графіки залежності температури деревини від безрозмірної координати χ за коефіцієнта надлишку повітря

Безрозмірна координата визначається за формулою:

$$\chi = \frac{\beta * k_0 * C_0 * \mu_0 * f * Q * 273^2 * R^3}{W_0 * (C_{\text{дер}} + \mu_0 * C_{\text{п}}) * E^3}$$

З рис. 4.9 можна побачити, що довжина ділянки загорання паливо-повітряної суміші суттєво залежить від початкової температури суміші (температури стінок камери згорання) та коефіцієнта надлишку повітря. Зокрема, значення χ безрозмірної довжини ділянки самоzapалювання

отримані для надлишку повітря α при одному з значень безрозмірної початкової температури суміші, наведено у таблиці 4.3. З таблиці 4.3 та рис. 4.9 видно, що при зростанні коефіцієнту надлишку повітря $\alpha > 1,3$ спостерігається суттєве зростання коефіцієнта тепловіддачі Ω та довжини ділянки самозапалювання суміші χ . Однак для $\alpha > 2,0$ та низьких початкових температур Θ_1 самозаймання не відбувається.

За результатами експериментальних досліджень процесів спалювання подрібненої деревної біомаси та аналізу складу димових газів було підтверджено, що для ефективного процесу горіння та високого коефіцієнта корисної дії котлоагрегату необхідно підтримувати значення коефіцієнта α в межах від 1,1 до 1,35.

Таблиця 4.3. – Можливість самозапалювання від коефіцієнта надлишку повітря

Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_{\text{п}}$	1,01	1,0201	1,1009	1,313	2,02	4,04
Довжина ділянки самозапалювання χ	8,1406	8,1507	8,5749	9,2112	10,4333	∞
Б/р коефіцієнт тепловіддачі Ω	0,02355	0,02402	0,028017	0,03986	0,05574	0,35717

Знайдемо функціональну залежність між початковою температурою та відповідною ділянкою запалювання:

$$\theta_1 = 0.073 + 0.02878 * e^{\frac{\chi_B^0}{11.21521}}$$

Залежність є універсальною для різних видів палива (деревних сумішей) і режимних параметрів

Значення безрозмірної ділянки самозапалювання можна визначити з рівняння:

$$\chi_v^0 = 791.70311 - 17558.94956\theta_1 + 98308.35565\theta_1^2$$

Температура запалювання буде залежати як від режимних умов, так і від розвитку процесу. Перебіг процесу самозагоряння з урахуванням тепловідведення описується залежністю такого виду:

Висновки до розділу 4

Процес самозапалювання розвивається поступово, при цьому темпи підвищення температурної кривої постійно збільшуються. Різке підвищення температури на кривій вказує на момент самозаймання. Значення координати χ , при яких спостерігається різке підвищення температури, дозволяють визначити безрозмірну довжину ділянки самозагоряння для початкової безрозмірної температури Θ_1 .

Комплекс проведених досліджень процесу спалювання деревної біомаси підтверджує важливість врахування властивостей обраного виду біомаси для точного оцінювання параметрів процесу самозаймання. З підвищенням температури середовища тривалість загорання скорочується.

Отримані результати математичного моделювання дають змогу використовувати їх для розробки ефективних конструкцій паливних пристроїв та забезпечення оптимального процесу спалювання вибраного виду деревної біомаси.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі представлені результати вирішення науково-технічної проблеми, спрямованої на підвищення ефективності енергетичного процесу спалювання здрібненої деревної біомаси. На основі аналітичних та експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

Проаналізовано особливості процесу спалювання здрібненої деревної біомаси з розміром частинок від 0,08 мм до 1 мм, теплоенергетичні характеристики та типи паливних пристроїв. Встановлено, що для спалювання такої біомаси доцільно використовувати камери згоряння, що дозволяють спалювати суміші різних фракцій, включаючи пилоподібні (фракція не більше 200 мкм), при цьому досягається високий коефіцієнт корисної дії, що може досягати 90%.

Визначено діапазони безрозмірних параметрів процесу спалювання, що дозволило застосувати математичну модель для теплового самозаймання деревної біомаси. Це дало змогу вивчити особливості процесу з урахуванням та без урахування тепловідведення, а також сформулювати вимоги до ефективного спалювання біомаси в паливних пристроях.

Розроблено методику розрахунку кінетичних констант для процесів термічного розкладання деревної біомаси на основі модифікованого кінетичного рівняння та рівнянь, отриманих методом найменших квадратів. Цю методику застосовано для обчислення кінетичних констант процесів термічного розкладу зразків біомаси, а отримані значення використано для моделювання процесу спалювання деревини та створених на її основі сумішей.

За результатами експериментальних досліджень спалювання зразків верби визначено кінетичні параметри (енергію активації та передекспоненційний множник) для ступеня перетворення α , що дозволяє аналізувати кінетику спалювання цієї породи деревини у паливних

пристроях енергетичних установок.

Отримано аналітичні залежності відносної втрати маси зразка верби від оберненої температури, що дозволяє вивчати стадії процесу горіння та сформулювати вимоги до умов спалювання цієї породи, зокрема щодо часу перебування деревних частинок у паливних пристроях.

На основі комплексного термічного та елементного аналізу визначено вплив терміну зростання верби на її теплоту згорання. Виявлено, що теплота згорання зростає на 10,2 % на рік, що дозволяє використовувати ці дані при розробці паливних пристроїв для спалювання швидкоростучих порід деревини.

Визначено вплив коефіцієнта надлишку повітря α при спалюванні генетично модифікованої деревини. Проведені дослідження підтвердили, що для забезпечення ефективного процесу горіння необхідно підтримувати коефіцієнт α від 1,15 до 1,4.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 року: аналітична записка БАУ. 2020. № 26. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Міністерство палива та енергетики України. 2006.
3. Місце біоенергетики в проекті оновленої Енергетичної стратегії України до 2035 року : аналітична записка БАУ. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics
4. Суходоля О. М. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Біла книга енергетичної політики України «Безпека та конкурентоспроможність». Проект. Національний інститут стратегічних досліджень, 2014. 41 с. URL: http://www.niss.gov.ua/public/File/2014_nauk_an_rozrobku/Energy%20Strategy%202035.pdf
5. Гелетуша Г. Г. Енергозабезпечення України: погляд у 2050 рік. *Зелена енергетика*. 2003. № 4. С. 7–10.
6. Малярєнко В. А., Лисак Л. В. Енергетика. Довкілля. Енергозбереження. Х. : Рубікон, 2004. 400 с. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ttar_2013_17\(2\)_41](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ttar_2013_17(2)_41)
7. Фурдичко О. І., Паштецький В. С. Проблема оптимізації використання природно-ресурсного потенціалу певного регіону. *Агроєкологічний журнал*. 2013. № 1. С. 17–24.
8. Пристая О. Д. Регуляторні передумови, ресурсний потенціал та техніко- економічні перспективи енергетичного використання деревини та її відходів в Україні. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2010. Вип. 20.5.
9. Гайда С. В. Проблема деревної сировини у Європі та Україні. *Лісове господарство, лісова, паперова та деревообробна промисловість: міжвід. наук.- техн. зб.* Львів : НЛТУ України, 2007. Вип. 33. С. 55–63.

10. Гелету́ха Г. Біоенергетика на задві́рках. *Економічна правда*. URL: <http://www.epravda.com.ua/columns/2013/03/20/366395/>
11. Ялечко В., Мисак Й., Гнатишин Я. Висотемпературна утилізація вживаної деревини. *Енергія з біомаси: матеріали 12-тої Міжнародної конференції* (м. Київ, 20–21 вересня 2016р.). URL.: <https://www.dropbox.com/sh/4yxhc7neftvgcm8/AAAc1ud4VIvkds3MQbBDi0SQa/abstacts?dl=0&preview=Abstract-Yalechko-ukr.pdf>
12. Mysak Y. S. Yalechko V. I., Yurasova O. G., Hnatyshyn Y. M., Mukha O. V. Heat capacity of biomass. Ninth international scientific-practical conference - Renewable energy sources as alternative to primary energy sources in region: Volume of scientific papers. Lviv: 6–7 of April, 2017. P. 140–141.
13. Удовиченко Г. А. Досвід виробництва альтернативних екологічно чистих видів палива на Полтавщині. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2010. № 3. 159 с.
14. Виробництво теплової енергії із біомаси. Аналіз законодавства, регуляторних аспектів і податкової політики та рекомендації щодо необхідних змін у чинному законодавстві. Звіт, підготовлений ВБО «Інститут місцевого розвитку» у рамках виконання Проекту «Місцеві альтернативні джерела енергії: м. Миргород». К., 2014. 100 с.
15. M.W. Vis, D. van den Berg. Biomass Energy Europe Harmonization of biomass resource assessments. Vol. I. Best Practices and Methods Handbook. November 2010. 220 p.
16. Ялечко В., Куцик А., Кенс І., Гнатишин Я., Муха О. Дослідження процесу горіння швидкоростучої деревини на ЕОМ. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: матеріали 7-мої Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Львів, 10–11 квітня 2013 р.). Львів. С. 132–134.
17. Hnatyshyn Y. M., Yalechko V. I., Kutsyk A. S., Atsberher Y.L., Mukha O. V. Fast-growing wood - an alternative fuel of thermal generat plants // VII-th International scientific-practical conference – Renewable energy

sources as alternative to primary energy sources in region, 10–11 of April 2013: materials. Lviv. P. 103–104.

18. Yalchko V., Kochubey V., Hnatyshyn Y., Dzyadevych B., Zaikov G. E. «Investigation of Thermal Power Characteristics of Wood Pulp» // The Chemistry and Physics of Engineering Materials - Two Volume Set. Vol. 1: Modern Analytical Methodologies. Apple Academic Press, USA – June, 2015. 750 p.

19. Гнатишин Я., Ялечко В. Підвищення ефективності спалювання деревини у теплогенераторах комунальних підприємств. *Поводження з відходами. Цивілізаційні виклики: матеріали Міжнародної конференції* (м. Львів, 19 червня 2015 р.). Львівська ТПП, Львів. С. 29–32.

20. Nussbaumer T., Oser M. Evaluation of biomass combustion based energy systems by cumulative energy demand and energy yield coefficient. Report for International Energy Agency and Swiss Federal Office of Energy, 2004

21. Pucker J, Zwart R., Jungmeier G. Greenhouse gas and energy analysis of substitute natural gas from biomass for space heat. *Biomass and bioenergy*, 2012. N 38. P. 95– 101.

22. Acheampong E. et al. Forest and tree tenure, access to timber and their impact on chainsaw operations in Ghana. In Marfo, E., K. A. Adam and B. D. Obiri (eds). Ghana case study of illegal chainsaw milling. Developing alternatives to illegal chainsaw milling through multi-stakeholder dialogue in Ghana and Guyana project. FORIG Research Report (CSIR-FORIG/TR/EM;KAA;BDO/2009/18)

23. Banana A.Y. et al. ‘Successful Forest Management: The Importance of Security of Tenure and Rule Enforcement in Ugandan Forests’, Forest Resources and Institutions, FTTP Working Paper No. 3, FAO, Rome, In: Gibson, C., McKean, M. A. and Ostrom, E. (eds.), 1998.

24. Hnatyshyn Y., Mysak Y., Yalchko V., Mukha O. Mini-power station on local fuel – an alternative to the development of low power systems of

Ukraine // Sixth international scientific-practical conference – Renewable energy sources as alternative to primary energy sources in region: Volume of scientific papers, 7–8 of April 2011. Lviv. P. 10–13.

25. Renewable Energy Road Map (Дорожня карта з відновлювальних джерел енергії). COM (2006) 848 final, 10.01.2007.

26. Brandstätter M. Rest-und Altholz; Anfall und Vermertung in osterreich. Holzforschung und Holzverwertung. 1994. No 3. S. 46–48.

27. Mantau U., Wagner J., Stoffstrommodell HOLZ. Bestimmung des Aufkommens, der Verwendung und des Verbleibs von Holzprodukten. Müll und Abfall. 2005. № 37 (6). S. 309–315.

28. Дудюк Д., Мазепа С., Гнатишин Я. Нетрадиційна енергетика: навч. Посіп. Львів : «Магнолія 2006», 2008. 188 с.

29. Мисак Й., Гнатишин Я., Івасик Я. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив : навч. посіб. Львів : Видавниц. Націонал.універс. «Львівська політехніка», 2002. 136 с.

30. IER (2006). Renewable Energy Policy in Ukraine. Working Paper No. V6. Institute for Economic Research and Policy Consulting.

31. Перспективи виробництва електричної енергії з біомаси в Україні: аналітична записка БАУ. 2013. № 5. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics

32. Аналіз додаткових джерел деревного палива в Україні: аналітична записка БАУ. 2016. № 15. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics

ДОДАТКИ

ОХОРОНА ПРАЦІ

А1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів на підприємстві та заходи по їх усуненню

Сонячних фотоелектричні установки не належать до пристроїв підвищеної небезпеки для життєдіяльності людини. Для енергетичних об'єктів, що використовуються як промислові пред'являються вимоги підвищеної небезпеки. Наведемо причини травматизму, що характерні при експлуатації сонячних електростанцій.

Небезпечна дія електричного струму спостерігається :

- при випадковому дотику до струмопровідних частин електрообладнання;
- поява напруги на металевих частинах електроустаткування через пошкодження ізоляції;
- поява напруги струмопровідних елементах через помилкове включення;
- виникнення крокової напруги через замикання проводу на землю.

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом є:

- недоступність струмопровідних елементів для випадкового дотику;
- трансформаторний поділ мережі;
- використання захисних систем або малих напруг;
- використання огорож та подвійної ізоляції;
- контроль стану ізоляції;
- компенсація ємнісних струмів;

- використання електрозахисних засобів;
- дотримання вимог техніки безпеки.

Одним із заходів, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках є захисне заземлення.

Захисне заземлення це навмисне електричне з'єднання з для усунення небезпеки ураження струмом у випадку дотику до елементів електроустановки.

Заземлення блискавкозахисту служить для захисту обладнання та використовується для створення шляху стікання струмів блискавки в землю.

Фахівці служб охорони праці контролюють безпечну експлуатацію електроустановок. Оперативне обслуговування електрообладнання здійснюється найманими чи власними оперативно-ремонтними працівниками. Оперативне обслуговування можуть здійснювати працівники, вимоги до кваліфікації та робіт оперативного персоналу зазначаються у внутрішніх інструкціях. Оперативне обслуговування електроустановок виконують працівники, які посадові і експлуатаційні інструкції, інструкції НПАОП та пройшли навчання перевірку знань з охорони праці та безпечної експлуатації електрообладнання.

А.2. Розрахунок блискавкозахисту для будівлі

Розрахунок блискавозахисту визначає тип захисту. За типом блискавозахист може бути однострижневим, багатострижневим та тросовий.

Для розрахунку обраного об'єкта перерахуємо вихідні данні:

$h = 25$ м, $h_x = 6$ м, $B = 100$ м, $n = 2$, тип блискавкозахист однострижневий.

где h – повна висота стрижневого блискавкозахисту, м;

h_x – висота споруди, що підлягає захисту, м;

B – ширина об'єкта ;

n – питома щільність блискавки, 1 / (км/год).

Визначаємо параметри блискавкозахисту:

$$h_0 = 0,85h = 0,85 \cdot 25 = 21,25 \text{ м} \quad (\text{A.2.1})$$

$$r_0 = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot h) \cdot h = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 25) \cdot 25 = 26,25 \text{ м} \quad (\text{A.2.2})$$

$$r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot h)(h - 1,2 \cdot h_x) = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 25) \cdot (25 - 1,2 \cdot 6) = 18,7 \text{ м} \quad (\text{A.2.3})$$

$$h_m = h - h_0 = 25 - 21,25 = 3,75 \text{ м} \quad (\text{A.2.4})$$

$$h_a = h - h_x = 25 - 6 = 19 \text{ м} \quad (\text{A.2.5})$$

$$\alpha = \arctg \frac{r_0}{h_0} = \arctg \frac{26,25}{21,25} = 51^\circ \quad (\text{A.2.6})$$

Визначаємо габаритні розміри обраного об'єкта, для якого виконується розробка блискавкозахисту:

$$\varphi = \arcsin \frac{B}{2r_x} = \arcsin \frac{100}{2 \cdot 18,7} = 69^\circ, \cos \varphi = \cos(69^\circ) = 0,35 \quad (\text{A.2.7})$$

$$A = 2r_x \cos \varphi = 2 \cdot 18,7 \cdot 0,35 = 13,09 \text{ м} \quad (\text{A.2.8})$$

$$A \times B \times H = 13,09 \times 100 \times 6$$

Визначаємо максимальне число уражень блискавкою за відсутності системи блискавкозахисту:

$$\begin{aligned} N &= \left[(B + 6h_x)(A + 6h) - 7,7h_x^2 \right] n \cdot 10^{-6} = \\ &= \left[(100 + 6 \cdot 6)(13,9 + 6 \cdot 6) - 7,7 \cdot 6^2 \right] \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 3,81 \cdot 10^{-3}, \end{aligned} \quad (\text{A.2.9})$$

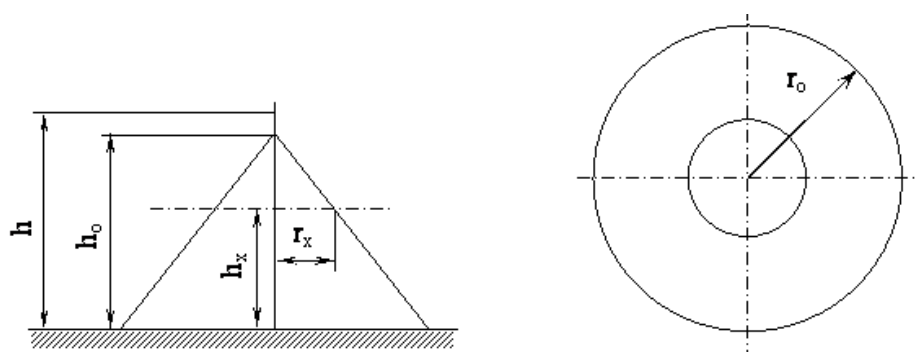


Рис. А.1 Зона захисту одиночним стрижневим блискавководом

Додаток Б

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВИБОРУ БІОПАЛИВНОЇ КОТЕЛЬНІ

В умовах дефіциту в Україні нафтового та газового палива та високої вартості промисловість має суттєво скорочувати їх обсяги споживання та переходити на альтернативні.

Тверде паливо сьогодні розглядається в Україні як вагома альтернатива традиційному пальному. Вважається, що його виготовлення в найближчі роки буде максимально вигідним для української економіки.

Основні види твердого палива :

- дрова, відходи деревини;
- тирсові, торф'яні та інші брикети;
- тирсові, торф'яні та інші гранули;
- кам'яне вугілля;
- деревні тріски;
- тирса;
- зерно, зернові відходи;

Загалом деревина як паливо характеризується високим виходом летючих горючих речовин, незначним вмістом золи, а також відсутністю сірки - основного корозійного компонента димових газів. Теплота згоряння дорівнює в середньому 18,67 МДж / кг (4460 ккал / кг).

Для повного відображення перспективності використання пеллетного котла проведемо його техніко-економічне порівняння з газовим котлоагрегатом.

Табл. Б.1. Вибір кількості та типу котлоагрегатів

Показник	Q_{Σ} , кВт	Кількість котлів N	Пеллетний котел	Газовий котел
Група споживачів №	3914	2	УЕАС 2000	RS-D 2000

Для визначення об'єму кількості палива, проведемо розрахунок виходячи з теплоти згорання палива. Теплота згорання пеллетів та природного газу наведена в таблиці Б.2.

Табл. Б.2 Теплота згорання розрахункових видів палива

Вид палива	Пеллети	Природний газ
Теплота згорання кВт·год/кг для щепи, для газу кВт·год/м ³	3,245 -4,757	8,0

Проведемо порівняння вартості біопаливним котлом «RS-D» та пеллетним котлом марки «УЕАС» результати порівняльного аналізу наведені в табл.Б.3.

Табл.Б.3 Порівняння вартості опалення мікрорайону.

Марка котла	«УЕАС»	«RS-D»
Вартість палива	1100 грн./т	2954 грн. за 1000 м ³
Кількість тепла, яку повинні виробити котли за рік кВт·год/рік.	129776944,33	103821555,78
Необхідна кількість палива	30899272,45 кг	12977694,47 м ³
Вартість палива, грн.	30899272,45	38336109,46

Визначимо витрати на оплату праці операторам котла. Середньомісячні витрати на опалення будуть рівними витратам на купівлю палива, та витратам на оплату праці операторам, і визначаються за формулою:

$$C_{\text{с1}} = \frac{B_{\text{нр1}}}{P_{\text{он}}} + B_{\text{зн}} = \frac{30899272,45}{12} + 3000 = 2577939,37 \text{ грн..}$$

$$C_{\epsilon 2} = \frac{B_{np2}}{P_{on}} + B_{zn} = \frac{38336109,46}{12} + 3000 = 3197675,79 \text{ грн.}$$

де C_{ϵ} - середньомісячні витрати на опалення;

B_{np} - річна вартість палива, грн.;

P_{on} - період опалення, місяців;

B_{zn} - місячні витрати на зарплатню операторам приймемо 3000 грн.

Визначимо річні витрати на опалення за формулою:

$$P_{\epsilon 1} = C_{\epsilon 1} \cdot P_{on} = 2577939,37 \cdot 12 = 30935272,44, \text{ грн.}$$

$$P_{\epsilon 2} = C_{\epsilon 2} \cdot P_{on} = 3197675,79 \cdot 12 = 38372109,48, \text{ грн.}$$

Визначимо період окупності проекту за формулою:

$$P_{ок} = \frac{B_{\kappa} + B_{mp}}{B_{oe} - B_{on}} = \frac{230000000 + 766666}{30935272,44 + 38372109,48} = 3,32 \text{ роки}$$

Період окупності проекту 3,32 роки, тобто проект має значну економічну ефективність. Отже, переробка відходів деревини є одним з перспективних напрямків розвитку вітчизняної біоенергетики. Використання відходів деревини є цінним продуктом для отримання теплової енергії, вони екологічно чисті і доступні в значній кількості.