

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЯЛЕЧКО Володимир Іванович

УДК 62-664.2

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОГО
ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ ЗДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ**

Спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В.І. Ялечко

Науковий керівник: Матіко Федір Дмитрович, доктор технічних наук, професор.

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д35.052.04*

/Ю.З.Вашкурак/

Львів – 2021

АНОТАЦІЯ

Ялечко В. І. Підвищення ефективності енерготехнологічного процесу спалювання здрібненої деревної біомаси. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06–технічна теплофізика та промислова тепло-енергетика. – Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуального завдання – розвитку наукових основ процесу спалювання здрібненої деревної біомаси та вдосконалення паливневих пристроїв для підвищення ефективності її спалювання. У роботі уточнено умови застосування математичної моделі процесу теплового самозаймання деревної біомаси, що дало можливість дослідити особливості перебігу цього процесу з урахуванням та без урахування тепловідведення і сформулювати вимоги до ефективного спалювання деревної біомаси в паливневих пристроях. Шляхом застосування у сукупності рівняння кінетики реакції горіння та методу найменших квадратів розроблено систему рівнянь для обчислення значень кінетичних констант реакції горіння деревини на основі результатів неізотермічного методу дослідження процесу горіння. Виконано експериментальні дослідження та визначено елементний склад різних порід деревини, зокрема і швидкоростучих сортів. За результатами термогравіметричного аналізу визначено кінетичні константи реакції горіння для верби енергетичної *Salix*, а також отримано аналітичні залежності відносно втрати маси зразка верби *Salix* від оберненої температури зразка, що дає можливість проаналізувати перебіг стадій процесу горіння зразка та сформулювати вимоги до умов спалювання цієї породи деревини в паливневих пристроях. Визначено вплив коефіцієнта надлишку повітря на паливневий режим при спалюванні генетично модифікованої деревини, що дає можливість обрати оптимальні значення режимних параметрів процесу спалювання такої деревини та знизити рівень викиду шкідливих речовин. За результатами виконаних досліджень удосконалено конструкцію паливневих пристроїв для спалювання здрібненої деревної біомаси,

що забезпечує зменшення втрат з механічним та хімічним недопалом і підвищення ефективності котлоагрегату на 1,0–2,0%. Результати дисертаційної роботи впроваджено на виробничих підприємствах, що займаються дослідженням, проектуванням, виробництвом та експлуатацією котельного устаткування.

Ключові слова: процес спалювання, деревна біомаса, кінетичні параметри, математична модель, термічний аналіз, енергетична верба, паливневий пристрій.

АННОТАЦІЯ

Ялечко В. И. Повышение эффективности энерготехнологического процесса сжигания измельченной древесной биомассы. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная тепло-энергетика. – Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи – развития научных основ процесса сжигания измельченной древесной биомассы и совершенствование топочных устройств для повышения эффективности ее сжигания. В работе уточнено условия применения математической модели процесса теплового самовоспламенения древесной биомассы, что позволило исследовать особенности протекания этого процесса с учетом и без учета теплоотвода и сформировать требования к эффективному сжиганию древесной биомассы в топочных устройствах. Путем применения в совокупности уравнения кинетики реакции горения и метода наименьших квадратов разработана система уравнений для вычисления значений кинетических констант реакции горения древесины на основе результатов неизотермического метода исследования процесса горения. Выполнены экспериментальные исследования и определены элементный состав древесины, в том числе и быстрорастущих сортов.

По результатам термогравиметрического анализа определены кинетические константы реакции горения для ивы энергетической *Salix* а также получены аналитические зависимости относительной потери массы образца ивы *Salix* от

обратной температуры образца, что дает возможность проанализировать ход стадий процесса горения образца и сформировать требования к условиям сжигания этой породы древесины в топочных устройствах. Определено влияние коэффициента избытка воздуха на топочный режим при сжигании генетически модифицированной древесины, что позволяет выбрать оптимальные значения режимных параметров процесса сжигания такой древесины и снизить уровень выброса вредных веществ. По результатам выполненных исследований усовершенствована конструкция топочных устройств для сжигания измельченной древесной биомассы, обеспечивает уменьшение потерь с механическим и химическим недопалом и повышает эффективность котлоагрегата на 1,0–2,0%. Результаты диссертационной работы внедрены на производственных предприятиях, занимающихся исследованием, проектированием, производством и эксплуатацией котельного оборудования.

Ключевые слова: процесс сжигания, древесная биомасса, кинетические параметры, математическая модель, термический анализ, энергетическая верба, топочный устройство.

SUMMARY

Yalechko V. I. Improving the efficiency of the energy-technological process of burning crushed wood biomass. – Qualifying scientific paper on the rights of the manuscript.

Thesis for a scientific degree in engineering on a specialty 05.14.06 – technical thermophysics and industrial thermal power engineering. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2021.

The dissertation work is devoted to the solution of the actual problem – development of scientific bases of process of burning of the crushed wood biomass and improvement of fuel devices for increase of efficiency of its burning. The conditions of application of the mathematical model of the process of thermal spontaneous combustion of wood biomass are specified in the work, which made it possible to investigate the peculiarities of this process, taking into account and without taking into account heat dissipation and to form requirements for efficient combustion of wood biomass in fuel

devices. By applying the combustion reaction kinetics equation and the least squares method together, a system of equations has been developed to calculate the values of the kinetic constants of the wood combustion reaction based on the results of the nonisothermal method for investigation the combustion process. Experimental studies have been performed and the elemental composition of different wood species, including fast-growing varieties, has been determined. According to the results of thermogravimetric analysis, the kinetic constants of the combustion reaction for energy willow *Salix* were determined and the analytical dependences of the relative weight loss of the *Salix* willow sample on the inverse temperature of the sample were obtained, which makes it possible to analyze the stages of the combustion process of the sample and to form requirements for the conditions of combustion of this species of wood in fuel devices. The influence of the excess air coefficient on the fuel regime during the combustion of genetically modified wood is determined, which makes it possible to choose the optimal values of the regime parameters of the combustion process of such wood and reduce the level of emissions. According to the results of the performed researches the design of fuel devices for burning of crushed wood biomass is improved, which provides reduction of losses with mechanical and chemical afterburning and increases the efficiency of the boiler unit by 1.0–2.0%. The results of the dissertation work are implemented at the production enterprises engaged in research, design, production and operation of boiler equipment.

Key words: combustion process, wood biomass, kinetic parameters, mathematical model, thermal analysis, energy willow, fuel device.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Ялечко В. І., Кочубей В. В., Гнатишин Я. М., Павловський Ю. П. Термічний аналіз деревини верби *Salix viminalis*. *Науковий вісник НЛТУ України* : зб. наук.-техн. праць. Львів : НЛТУ, 2016. № 26.4. С. 247–251.
2. Ялечко В. І., Матіко Ф. Д. Котельня на основі удосконаленої паливної підвищеної ефективності. *Науковий вісник НЛТУ України*: зб. наук.-техн. праць. Львів : НЛТУ, 2017. № 27.6. С. 131–134.

3. Ялечко В. І., Мисак Й. С., Матіко Ф. Д. Дослідження кінетичних параметрів термічного розкладання деревної фітомаси. *Вісник Інженерної академії України*. Київ, 2017. № 2. С. 104–109.
4. Yalchko V. Investigation of Thermal Power Characteristics of Wood Pulp / V. Yalchko, V. Kochubey, Y. Hnatyshyn, B. Dzyadevych and G. E. Zaikov // *The Chemistry and Physics of Engineering Materials – Two Volume Set. Volume 1: Modern Analytical Methodologies*. Apple Academic Press, USA – August, 2015 – P. 171–178.
5. Патент України на корисну модель № 51768 UA МПК F26B 23/00 (2009). Теплогенератор з вихровою ежекцією генераторного газу / С. С. Лис, Я. М. Гнатишин, В. І. Ялечко. 2010. № 14; заявл. 09.03.2010; опубл. 26.07.2010, Бюл. № 14.
6. Патент України на корисну модель № 93790 UA МПК F27B 3/04 (2006.01). Камерна паливня для спалювання деревної біомаси / В. І. Ялечко, Я. М. Гнатишин. 2014. № 19; заявл. 27.05.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19.
7. Hnatyshyn Y. Fuel devise for thermal energy generation from waste phytomass / Y. Hnatyshyn, T. Rymar, I. Kens, V. Yalchko // *Electric power engineering & control systems 2010: Proceedings of the 2ND international conference of young scientist*. Lviv, 2010. P. 94–95.
8. Hnatyshyn Y. Mini-power station on local fuel – an alternative to the development of low power systems of Ukraine / Y. Hnatyshyn, Y. Mysak, V. Yalchko, O. Mukha // *Sixth international scientific-practical conference – Renewable energy sources as alternative to primary energy sources in region: Volume of scientific papers*. Lviv, 7–8 of April, 2011. P. 10–13.
9. Yalchko V. Investigation of combustion process low-grade fuels / V. Yalchko, S. Lebedev, A. Furtas, V. Kuzma // *Sixth international scientific-practical conference – Renewable energy sources as alternative to primary energy sources in region: Volume of scientific papers*. Lviv, 7–8 of April 2011. P. 257–260.
10. Гнатишин Я., Ялечко В., Муха О. Математичне моделювання впливу властивостей біопалива на процес спалювання. *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*: матеріали 2-

го Міжнародного конгресу. Львів, 19–22 вересня 2012 р. С. 82.

11. Hnatyshyn Y., Yalchko V., Mukha O. Gathering and utilization the logging residues in order to produce energy // International Congress – Agroforestry: oral presentations at the poster session. Berlin, Germany, 19–20 February 2013.

12. Гнатишин Я. М., Ялечко В. І., Куцик А. С., Ацбергер Й. Л., Муха О. В. Швидкоростуча деревина – альтернативне паливо теплогенеруючих установок. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні*: матеріали VII-тої Міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 10–11 квітня 2013. С. 103–104.

13. 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 VII-мої Міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 10–11 квітня 2013. С. 132–134.

14. Ялечко В. І., Гнатишин Я. М., Муха О. В. До питання використання деревної біомаси. *Нафтогазова енергетика 2013*: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Івано-Франківськ, 7–11 жовтня 2013. С. 200–202.

15. Hnatyshyn Y., Yalchko V., Mukha O. Mathematical modeling influence of properties of biofuel on burning process / Zborník vedeckých prác v rámci projektu Nové technológie preenergeticky environmentálne a ekonomicky efektívne zhodnocovanie biomasy ITMS: 26220220063. Medzinárodná vedecká konferencia a otvorenie centra VVICB. Капуňаны при Пре́нове, Барdejovské кúпеle, 06–08.11.2013. Р. 70.

16. Ялечко В., Гнатишин Я., Муха О. Виробництво електричної енергії з деревини та її відходів. *Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції, водопостачання і водовідведення*: матеріали. Рівне, 2015. С. 189–191.

17. Ялечко В., Гнатишин Я., Кенс І., Муха О. Когенеруючі установки на відходах деревини. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні*: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 2–3 квітня 2015. С. 122–125.

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

19. Ялечко В., Мисак Й., Гнатишин Я. Висотемпературна утилізація вживаної деревини. *Енергія з біомаси*: матеріали 12-тої Міжнародної конференції, м. Київ, 20–21 вересня 2016 р.

20. Ялечко В. І. Можливість використання деревних відходів як альтернативного палива для котельних установок. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні* : матеріали X-тої Міжнародної науково-практичної конференції 2019 р.: зб. наук. праць. Львів, 4–5 квітня, 2019. С. 146–148.

21. Yalchko V. I. Prospects of using wood biomass as fuel in boiler plants. *Інноваційні технології у розвитку сучасного суспільства*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 18–19 квітня, 2019. С. 146–148.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 Сучасний стан досліджень процесу спалювання здрібненої деревної біомаси.....	19
1.1 Особливості спалювання здрібненої деревної біомаси.....	19
1.2 Аналіз теплоенергетичних характеристик деревної біомаси.....	21
1.3 Характеристика та потенціал відходів деревини.....	30
1.4 Фракційний склад здрібненої деревної біомаси.....	34
1.5 Способи спалювання деревної біомаси.....	37
1.6 Паливневі пристрої для спалювання деревної біомаси.....	42
РОЗДІЛ 2 Математиче моделювання процесу спалювання здрібненої деревної біомаси.....	51
2.1 Розв'язок нестационарної задачі теплового самозапалювання.....	51
2.2 Дослідження процесу самозапалювання з врахуванням тепловідведення...55	55
2.3 Підхід на основі неізотермічного методу до визначення кінетичних констант процесу спалювання деревної біомаси.....	57
РОЗДІЛ 3 Методика експериментальних досліджень кінетичних констант процесу спалювання деревної біомаси.....	60
3.1 Матеріали та устаткування, що використані в експериментальних дослідженнях.....	61
3.2 Методика експериментальних досліджень кінетичних констант процесу спалювання здрібненої деревної біомаси.....	68
3.3 Методика опрацювання результатів експериментальних досліджень.....	74
РОЗДІЛ 4 Аналіз результатів експериментальних досліджень спалювання здрібненої деревної біомаси.....	78
4.1 Експериментальне дослідження основних закономірностей процесу спалювання здрібненої деревної біомаси.....	78

4.2 Аналіз результатів експериментальних досліджень процесу спалювання здрібненої деревної біомаси.....	87
РОЗДІЛ 5 Удосконалення конструкції паливневих пристроїв для спалювання здрібненої деревної біомаси.....	97
5.1 Визначення оптимального значення коефіцієнта надлишку повітря $\alpha_{\text{п}}$ для процесу спалювання здрібненої деревної біомаси.....	98
5.2 Удосконалення конструкції паливні для спалювання здрібненої деревної біомаси.....	102
ВИСНОВКИ.....	115
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118
ДОДАТКИ.....	130

ВСТУП

Нині біомаса посідає четверте місце за значенням палива у світі, її споживання становить приблизно 14% загального споживання первинних енергоносіїв у світі (в країнах, що розвиваються – понад 30%, іноді до 50–80%). В Європейських державах частка біомаси у загальному споживанні первинних енергоносіїв становить у середньому понад 3%. Деякі країни значно перевищують цей показник: Фінляндія – 23%, Швеція – 18%, Австрія – 12%, Данія – 8%, Німеччина – 6%. Україна як європейська держава не може залишатись осторонь, враховуючи те, що з-поміж Європейських країн у нашої держави найбільший потенціал для розвитку альтернативних джерел енергії.

У лісах є значна кількість не використаної деревини та її відходів. Спалювання деревних відходів у сучасному розробленому обладнанні належить до екологічно прийнятних методів використання промислових відходів. Саме тому сучасні проблеми енергетики можуть бути вирішені у разі раціонального використання всіх наявних джерел палива й енергії, чільне місце з-поміж яких посідає деревна біомаса.

Важливу роль сьогодні відводять використанню у якості палива швидкоростучої деревини. Під час згоряння деревини в котлах теплогенеруючих організацій, електростанцій в складі продуктів горіння в атмосферу викидається вуглекислий газ, однак відсутні такі шкідливі компоненти як оксиди сірки. Вуглекислий газ поглинають рослини в період їх росту, тому вплив спалювання деревини на довкілля є значно меншим у порівнянні з викопними видами палива (нафтою, вугіллям).

Ефективне та екологічне спалювання біомаси в паливневих пристроях визначається особливостями режиму горіння, зокрема кінетикою процесу горіння. Однак, унаслідок невизначеності характеристик деревної біомаси вибір оптимального робочого режиму котла є ускладненим. Кінетичні параметри процесу горіння залежать від характеристик деревного палива. Тому для організації ефективного спалювання деревної біомаси необхідно дослідити енергетичні

характеристики деревної біомаси, кінетичні параметри процесу горіння кожного окремого виду біомаси та розробити математичні моделі для дослідження процесу спалювання біомаси у паливнях енергетичних установок. Наявність таких моделей дає можливість удосконалити паливневі пристрої та підвищити ефективність технологічного процесу спалювання подрібненої біомаси, а отже й досягти вищої ефективності енергетичних установок а також зменшити їх шкідливий вплив на довкілля.

Метою дисертаційної роботи є розвиток наукових основ процесу спалювання здрібненої деревної біомаси та вдосконалення паливневих пристроїв для підвищення ефективності її спалювання.

Для досягнення обраної мети потрібно виконати такі завдання:

- 1) проаналізувати пристрої для спалювання здрібненої деревної біомаси різних порід, відходів деревини та їх сумішей;
- 2) визначити умови застосування математичної моделі процесу спалювання здрібненої деревної біомаси;
- 3) провести експериментальні дослідження процесу спалювання здрібненої деревної біомаси для визначення кінетичних констант цього процесу;
- 4) на основі проведених досліджень визначити режимні параметри процесу горіння для підвищення ефективності процесу спалювання здрібненої деревної біомаси;
- 5) удосконалити конструкцію паливневих пристроїв для підвищення їх енергоефективності.

Об'єктом дослідження є енерготехнологічний процес спалювання здрібненої деревної біомаси.

Предмет дослідження – математичні моделі процесу горіння деревної біомаси та конструкції паливневих пристроїв котельних агрегатів.

Методи дослідження. Використано стандартизовані методи проведення досліджень кінетичних характеристик деревної біомаси та процесу спалювання. В процесі проведення експериментів використовувалися сучасні контрольно-

вимірювальні прилади й установки, методи математичного моделювання процесу спалювання деревної біомаси. Результати експериментальних даних оброблено із застосуванням чисельних методів і методів математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. -Уточнено умови застосування математичної моделі процесу теплового самозаймання деревної біомаси, що дало змогу дослідити особливості перебігу цього процесу з урахуванням та без урахування тепловідведення та сформулювати вимоги до ефективного спалювання деревної біомаси в паливневих пристроях.
2. -Шляхом застосування сукупно рівняння кінетики реакції горіння та методу найменших квадратів розроблено систему рівнянь для обчислення значень кінетичних констант реакції горіння деревини на основі неізотермічного методу дослідження процесу горіння.
3. -На основі результатів термогравіметричного аналізу вперше отримано аналітичні залежності відносно втрати маси зразка верби енергетичної *Salix* від оберненої температури зразка, що дає можливість проаналізувати перебіг стадій процесу горіння зразка та сформулювати вимоги до умов спалювання цієї породи деревини в паливневих пристроях.
4. Отримано залежності параметрів процесу самозагоряння генетично модифікованої деревини від коефіцієнта надлишку повітря, що дає змогу обрати режимні параметри процесу спалювання такої деревини для підвищення ефективності паливневих пристроїв та зниження рівня викиду шкідливих речовин.

Ступінь достовірності та обґрунтованості наукових положень, сформульованих у роботі. Наукові положення дисертаційної роботи, результати досліджень, висновки та рекомендації мають достатню обґрунтованість і достовірність. Вони забезпечуються коректністю і відповідністю розроблених наукових положень отриманим результатам експериментальних досліджень. Одержані результати не суперечать основним положенням науки, а також підтверджуються апробацією і практичною реалізацією. Вони базуються на значній

кількості експериментальних даних, зібраних у результаті проведення комплексних досліджень. Достовірність отриманих експериментальних результатів забезпечувалося використанням у роботі сучасних приладів, устаткування та перевірених методик дослідження, а також застосуванням загальновідомих методів математичної статистики та обробки експериментальних даних.

Особистий внесок здобувача.

Основні наукові результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані автором особисто.

У наукових публікаціях, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: в роботах [19, 20] запропоновано спосіб спалювання швидкоростучої і вживаної деревини, сформовані рекомендації щодо організації процесу спалювання, а також розроблено конструкцію паливного пристрою для спалювання швидкоростучої деревини та деревних відходів; в роботах [25, 26, 28] проаналізовано перспективи заміщення вуглеводнів деревною біомасою та проведено математичне моделювання процесу горіння швидкоростучої деревини та оброблення результатів моделювання; в роботі [31] виконано аналіз конструктивних особливостей типових котельних агрегатів та розроблено паливний пристрій для спалювання деревини; в роботі [34] виконано математичне оброблення результатів досліджень деревини верби *Salix Viminalis*; в роботі [43] проведено аналіз можливості впровадження малих тепло- та електростанцій на місцевих видах палива та здійснено порівняння доцільності їх будівництва із великими ТЕС та ТЕЦ; в роботах [30, 110] виконано термічний аналіз деревини швидкоростучих порід та виконано математичну обробку результатів дослідження; в роботі [111] розроблено конструкцію камерної паливни для спалювання здрібненої деревної біомаси.

Апробація результатів дослідження. Основні положення дисертаційної роботи та її окремі розділи і результати обговорювалися на:

- 2-му Міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 19–22 вересня 2012 р., м. Львів;
- Gathering and utilization the logging residues in order to produce energy // International Congress – Agroforestry, 19–20 February 2013. Berlin, Germany;
- 7-й Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», 10–11 квітня 2013 р., м. Львів;
- 2-му Міжнародному Форумі Нафтовиків «Шляхи подолання екологічних проблем на досвіді міст Західної Європи та України, постраждалих від тривалого використання надр», 29–30 серпня 2013 р., м. Борислав;
- Міжнародній науково-технічній конференції та виставці «Нафтогазова енергетика 2013», 7–11 жовтня 2013 р., м. Івано-Франківськ;
- науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, наукових співробітників, докторантів та аспірантів за підсумками наукової діяльності у 2013 році «Конструктивні особливості пристроїв для утилізуваня деревної маси», 14–15 травня, 2014 р., м. Львів;
- 3-му Міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 17–19 вересня 2014 р., м. Львів;
- 7-й Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», 2–3 квітня 2015 р., м. Львів;
- науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, наукових співробітників, докторантів та аспірантів за підсумками наукової діяльності у 2014 році, 2 червня, 2015 р., м. Львів;
- Міжнародній конференції «Поводження з відходами. Цивілізаційні виклики», 19 червня 2015 р., м. Львів;

- 8-й Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», 2–3 квітня 2015 р., Львів;
- 15-й Міжнародній науково-практичній конференції «Ресурси природних вод Карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання», 2016 р., Львів;
- 12-й Міжнародній конференції «Енергія з біомаси», 2016 р., Київ;
- 9-й Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», 2017 р., Львів.

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 21 наукову працю, з них 3 – у фахових виданнях, 1 – розділ у закордонній колективній монографії (США), 15 – у матеріалах і тезах доповідей науково-практичних конференцій і 2 – у патентах на корисні моделі.

Структура роботи відповідає сформульованій меті й завданням і складається з *анотації, вступу, п'яти розділів (Розділ 1 «Сучасний стан досліджень процесу спалювання здрібненої деревної біомаси», Розділ 2 «Математичне моделювання процесу спалювання здрібненої деревної біомаси», Розділ 3 «Методика експериментальних досліджень кінетичних констант процесу спалювання деревини та її відходів», Розділ 4. «Аналіз результатів експериментальних досліджень спалювання здрібненої деревної біомаси», Розділ 5 « Удосконалення конструкції паливневого пристрою для спалювання здрібненої деревної біомаси»), висновків, списку використаних джерел (115 найменувань), додатків. Матеріал викладено на 149 сторінках. Зокрема, робота проілюстрована 22 рисунками, містить 21 таблицю.*

Наукове значення виконаного дослідження

Наукове значення виконаної роботи полягає розвитку наукових основ процесу спалювання здрібненої деревної біомаси та удосконалення паливневих пристроїв для підвищення ефективності її спалювання.

Результати дисертаційної роботи можуть бути застосовані у таких наукових галузях як: технічна теплофізика та промислова теплоенергетика, теплові

енергоустановки.

Результати досліджень можуть бути застосовані на підприємствах, які займаються проектуванням та виробництвом котельного устаткування, а також підприємствами, установами й організаціями, які експлуатують котельні установки, що використовують як паливо здрібнену деревну біомасу.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено методику обчислення кінетичних констант процесу спалювання здрібненої деревної біомаси на основі результатів експериментальних досліджень цього процесу за допомогою методу дериватографії.
2. За результатами експериментальних досліджень зразків верби енергетичної *Salix* визначено кінетичні параметри (енергію активації, передекспоненційний множник) процесу її горіння, що дає можливість проаналізувати кінетику спалювання цієї породи деревини у паливневих пристроях енергетичних установок.
3. Удосконалено конструкцію паливневого пристрою для спалювання здрібненої біомаси, яка відрізняється наявністю виступів в основній камері згорання та півсферичною стелею камер згорання та допалювання для створення додаткового вихору спалюваної деревної суміші, що забезпечує більш ефективний розподіл теплових потоків і повне спалювання здрібненого деревного палива. Використання паливень запропонованої конструкції дозволяє підвищити ефективність роботи шляхом інтенсифікації спалювання деревної біомаси.
4. Удосконалено конструкцію паливневого пристрою для спалювання здрібненої деревної біомаси шляхом введення конусної рухомої колосникової решітки, що забезпечує активний контакт поверхні здрібнених частинок деревини та кисню та дає змогу зменшити втрати з механічним недопалом. Використання паливень запропонованої конструкції дозволяє підвищити ККД котельного агрегату на 1,0–2,0%.
5. Впроваджено вдосконалення паливневого пристрою під час перевodu міні-котельні з спалювання природного газу на спалювання відходів

деревини на підприємстві ПАТ «ДМЗ». Запропоновані вдосконалення разом із заміною виду палива забезпечили зменшення витрат на оплату енергоносіїв, одночасно зменшуючи шкідливий вплив продуктів згорання на екологічний стан довкілля.

- б. Впроваджено удосконалену конструкцію камерної паливни з обертовою колосниковою решіткою на Україно-чеському СП «Ройек-Львів». Використання запропонованої конструкції паливни у кінцевому результаті забезпечило підвищення коефіцієнта корисної дії експериментального зразка котельного агрегату на 1,4%.

Результати досліджень можуть бути застосовані на підприємствах, які займаються проектуванням та виробництвом котельного устаткування, а також підприємствами, установами та організаціями, які експлуатують котельні установки, що використовують у якості палива здрібнену деревну біомасу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є складовою науково-дослідних робіт, які виконуються відповідно до основних напрямів наукової діяльності Національного університету «Львівська політехніка». Робота виконувалася за науковим напрямом кафедри теплоенергетики, теплових та атомних електричних станцій «Підвищення ефективності та надійності теплоенергетичного і тепловикористовуючого устаткування», що відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Енергетика та енергоефективність» із урахуванням положень координаційних планів галузі теплоенергетики, рішень науково-технічних конференцій, семінарів, нарад з проблем енергетики та енергозбереження. Дисертація виконана в межах таких науково-дослідних робіт: госпдоговірної теми Г/д №1020-ЗЭ-БуТЭС/0567 «Організація зміни паливного режиму роботи котлів ТП-100 за оптимальних режимів роботи КБМ та спалюванні непроектованих видів палива», держбюджетної НДР ДБ 08.16-02-12 «Розроблення енергоощадних технологій виготовлення дереворізальних інструментів» (номер держаної реєстрації 0112U003033), НДР «Теоретичне обґрунтування та експериментальне дослідження ефективності роботи котельних установок в процесі довготривалої експлуатації» (номер держаної реєстрації 0115U000439).

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ ЗДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ

1.1 Особливості спалювання дрібної деревної біомаси

У деревній біомасі нема ні сірки, ні фосфору. Загальновідомо, що головною втратою тепла в котлоагрегаті є втрата теплової енергії з відхідними газами, яка визначається температурою відхідних газів. Ця температура під час спалювання палив, що містять сірку, з метою уникнення сірчаноокислотної корозії хвостових поверхонь нагріву підтримується не нижче 200... 250°C. Водночас під час спалювання деревних відходів, що, як зазначалося, не містять сірку, ця температура може бути знижена до (80–90) 110 ... 120 ° С, а це дасть змогу суттєво підвищити ККД (коефіцієнт корисної дії) котлоагрегатів. Отже, одним із реальних заходів, які вживають для економії палива у котельнях лісопромислових підприємств, є встановлення додаткових хвостових поверхонь нагріву в котлоагрегатах, що працюють на деревних відходах [1, 4, 22, 29, 49, 52].

Вихід летких при спалюванні деревного палива є також однією з особливостей деревної біомаси як палива і дозволяє мати велику протяжність факелу, в якому здійснюється згорання горючих компонентів, що формуються в шарі деревної біомаси. Це створює умови для ефективної роботи радіаційних поверхонь нагріву котлоагрегату [2–3, 12, 26, 29, 75, 105].

Продукт коксування деревної біомаси – деревне вугілля – має вищу реакційну здатність порівняно з викопним вугіллям. Висока реакційна здатність деревного вугілля уможлиблює роботу паливневих пристроїв за низьких значень коефіцієнта надлишку повітря, що, своєю чергою, позитивно впливає на ефективність роботи котельних установок під час спалювання у них деревної біомаси [4–5, 12, 26, 75, 76, 105].

Однак, незважаючи на позитивні якості, деревина має особливості, котрі негативно впливають на роботу котлоагрегатів. До цих особливостей, власне,

належить здатність поглинання вологи, тобто збільшення вологості у водному середовищі. Приміром, під час сплаву деревини, сортування її у водних басейнах, у разі зберігання її під відкритим небом вологість деревини підвищується. Гранична кількість води, яку може поглинути деревина, складається з максимальної кількості зв'язаної та вільної вологи. Найбільша кількість зв'язаної вологи визначається межею насичення стінок клітин, а кількість вільної вологи залежить від обсягу порожнин між клітинами та всередині них. У першому наближенні максимальна кількість вологи можна підрахувати за формулою [6–8, 21, 88, 94; 95, 113, 115]:

$$W_a^{max} = 30 + \frac{1.54 - \gamma_0}{1.54} 100 \quad (1.1)$$

де W_a^{max} – максимально можлива абсолютна вологість деревини; γ_0 – щільність деревини в абсолютно сухому стані.

Формула (1.1) є наближеною, позаяк вологість у точці насичення стінок клітин і щільність деревинної речовини взята середня. Крім того, під час отримання формули (1.1) зроблено припущення, що всі порожнини деревини заповнені вологою. Насправді в деяку частину пустот вода проникнути не може, тому результати, отримані за формулою, будуть перевищувати експериментальні значення. Однак для теплотехнічних розрахунків такі результати є прийнятними – отримані значення вмісту вологи є граничними та відтворюють найгірші умови спалювання [9, 7, 10, 24, 29, 46, 49, 75].

Характерною особливістю деревини як палива є незначний вміст внутрішньої золи (не перевищує 1%). Водночас зовнішні мінеральні включення у відходах лісозаготівель почасти сягають $A^c = 20$ %. Зола, що утворюється під час згорання чистої деревини тугоплавка, і видалення її із зони горіння паливни не має особливої технічної складності. Мінеральні включення у деревній біомасі легкоплавкі. Під час згорання деревини зі значним їх вмістом утворюється спечений шлак, видалення якого з високотемпературної зони паливневого пристрою ускладнено й вимагає для забезпечення ефективної роботи особливих технічних рішень.

Спечений шлак, що утворюється при спалюванні високозольної деревної біомаси, має хімічну подібність з цеглою, і за високих температур у паливневому пристрої спікається з поверхнею цегляної кладки стінок паливни, що ускладнює шлаковидалення.

Термічний спосіб є одним з найбільш застосовуваних під час перероблення деревної біомаси. Його умовно поділяють залежно від кінцевого продукту на: піроліз, газифікацію та спалювання [3–6, 10, 26, 28, 38–39, 44, 72, 93, 111–112].

1.2 Аналіз теплоенергетичних характеристик деревної біомаси

1.2.1 Вологість

Вологість деревної біомаси – це кількісна характеристика, яка показує вміст у біомасі води. Є абсолютна й відносна вологість біомаси.

Абсолютною вологістю називають відношення маси води до маси сухої деревини [11, 32–33, 70–71, 73–74]:

$$W_a = \frac{m - m_0}{m_0}, \quad (1.2)$$

де W_a – абсолютна вологість, %; m – маса взірця у вологому стані, г; m_0 – маса цього ж взірця, висушеного до постійного значення, г.

Відотною чи робочою вологістю називають відношення маси води до маси вологої деревини [12, 32–33, 70–71, 73–74]:

$$W^p = \frac{m - m_0}{m}, \quad (1.3)$$

де W^p – відносна, або робоча, вологість.

Перерахунок абсолютної вологості у відносну і навпаки здійснюється за допомогою таких формул [13, 32–33, 70–71, 73–74]:

$$W^p = \frac{100W_a}{100 + W_a}; \quad (1.4)$$

$$W_a = \frac{100W^p}{100 - W^p}. \quad (1.5)$$

Під час аналізу процесів сушіння деревини використовують абсолютну

вологість (1.2).

У теплотехнічних розрахунках застосовують переважно відносну, або робочу вологість (1.4) [14, 70–74, 91, 104].

Розрізняють дві форми вологи, що міститься в деревній біомасі: зв'язану (гігроскопічну) і вільну. Зв'язана волога є всередині стінок клітин й утримується фізико-хімічними зв'язками; видалення цієї вологи пов'язане з додатковими витратами енергії та суттєво відображається на більшості властивостей деревинної речовини. Вільна волога є у порожнинах клітин і в міжклітинних просторах. Вільна волога втримується тільки механічними зв'язками, видаляється значно легше і має менший вплив на механічні властивості деревини.

Стан деревинної речовини, за якого вільної вологи нема, а клітинні стінки містять максимальну кількість зв'язаної вологи, відповідає межі насичення або межі гігроскопічності [15, 70–74].

Межею насичення $W_{\text{м.н.}}$ є максимальна вологість деревинної речовини клітинних стінок свіжозрубаної деревини або деревини, зволоженої за допомогою тривалого витримання у воді [16, 7–10, 70–74].

Межею гігроскопічності $W_{\text{м.г.}}$ є максимальна вологість клітинних стінок деревинної речовини при зволоженні її в насиченому вологою повітрі.

При витримці деревини на повітрі відбувається обмін вологою між повітрям і деревинною речовиною. Якщо вологість деревинної речовини дуже висока, то за такого обміну відбувається висихання деревини. Якщо ж вологість її низька, то деревинна речовина зволожується. Тривале перебування деревини на повітрі, за умов стабільних температур й відносної вологості повітря, вологість деревини стає також стабільною; це досягається тоді, коли пружність водяної пари в навколишньому повітрі зрівняється з пружністю парів води біля поверхні деревини. Величина стабільної вологості деревини, витриманої тривалий час за відповідних значень температур і вологості повітря, однакова для всіх деревних порід, але залежить від напряму процесу [17, 7–10, 70–74].

Дрібна деревина (тирса, стружка, тріска) з великою питомою поверхнею має мізерно малий гістерезис сорбції та її стійку вологість називають рівноважною W_p^p .

Рівноважна вологість однакова у деревини різних порід і повністю визначається параметрами повітря, у середовищі якого вона знаходиться, тобто його температурою(t) і відносною вологістю (ϕ).

Залежно від вологості стовбурову деревину поділяють на мокру, свіжозрубану, повітряно-суху, кімнатно-суху та абсолютно суху. Мокрою є деревина, що тривалий час перебувала у воді, наприклад при сплаві або сортуванні у водному басейні. Вологість мокрої деревини W^p перевищує 50%. Свіжозрубаною називають деревину, що зберегла вологу дерева, що росте. Вона залежить від породи деревини і змінюється в межах $W^p = 33 \dots 50\%$ [18, 11, 20–31, 70–74, 104].

Середня вологість свіжозрубаної деревини становить: у ялини 48%, у модрина 45%, у ялиці 50%, у сосни кедрової 48%, у сосни звичайної 47%, у верби 46%, у липи 38%, у осики 45%, у вільхи 46%, у тополі 48%, у берези бородавчастої 44%, у бука 39%, у в'яза 44%, у граба 38%, у дуба 41%, у клена 33%.

Повітряно-суха – це деревина, витримана тривалий час на відкритому повітрі. Під час перебування на відкритому повітрі деревина постійно підсихає і її вологість поступово знижується до стійкої величини. Вологість повітряно-сухої деревини $W^p = 13 \dots 17\%$.

Кімнатно-суха деревина – це деревина, яка тривалий час є в опалюваному і вентилярованому приміщенні. Вологість кімнатно-сухої деревини $W^p = 7 \dots 11\%$.

Абсолютно суха - деревина, висушена при температурі $t = 103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ до постійної величини.

У дереві, що росте, вологість стовбурової деревини розподілена нерівномірно. Вона змінюється і по радіусу, і по висоті стовбура.

Вологість кори в свіжозрубаному стані змінюється в широких межах. За дослідженнями [19, 70–74], вологість кори окремих ділянок колод коливалася у соснових сортиментів від 40 до 211%, у ялинових від 40 до 159% і у березових від 38 до 82% абсолютної вологості. У кори сосни вологість суттєво змінюється по висоті стовбура, вологість кори прикореневих колод нижча вологості вершинних. У ялини та берези вологість кори по висоті стовбура майже однакова.

За даними [20, 70–74], відносна вологість кори хвойних порід збільшується

при сплаві до 80 ... 84%, вологість лубу водночас доходить до 85 ... 90%. Оскільки відносна критична вологість кори становить 60%, то очевидно, що кора хвойних порід після сплаву перед спалюванням повинна бути зневоднена за допомогою будь-якого способу.

Максимальна вологість стовбурової деревини обмежена сумарним об'ємом порожнин клітин і міжклітинних просторів. У результаті гниття деревини її клітини руйнуються й відтак утворюються додаткові внутрішні порожнини, структура гнилої деревини, відповідно до розвитку процесу гниття, стає пористою, рихлою, міцність деревини різко знижується.

Вологість деревної гнилі не обмежена й може сягати таких високих значень, за яких її спалювання стане неефективним. Збільшена пористість гнилої деревини робить її дуже гігроскопічною, перебуваючи на відкритому повітрі, вона швидко зволожується.

1.2.2 Зольність

Зольність – це вміст у паливі мінеральних речовин, котрі залишаються після повного згорання горючої маси. Як відомо, зола є небажаною частиною палива, тому що знижує вміст горючих елементів і ускладнює експлуатацію паливневих пристроїв. Під час проведення аналізів вміст золи підраховується на суху масу палива. Перерахунок зольності на робочу масу проводиться за формулою [21, 70–74]:

$$A^p = A^c \left(\frac{100 - W^p}{100} \right), \quad (1.6)$$

де A^p – вміст золи в розрахунку на робочу масу, %; A^c – вміст золи на суху масу палива, %; W^p – робоча вологість палива, %.

Зола поділяється на внутрішню, що міститься у деревній речовині, і зовнішню, що потрапила в паливо під час заготівельних робіт, зберігання та транспортування біомаси. Залежно від виду зола має різну плавкість при нагріванні до високої температури. Легкоплавкою називається зола, що має температуру початку рідкоплавкого стану нижче 1350°C. Середньоплавка зола має температуру початку рідкоплавкого стану в межах 1350–1450°C. У тугоплавкої золи ця температура

вище 1450°C. Внутрішня зола деревної біомаси є тугоплавкою, а зовнішня – легкоплавкою. Вміст золи в різних частинах дерев різних порід показано в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Розподіл золи в частинах дерева для різних порід [18]

Порода	Кількість золи в абсолютно сухій масі, %		
	Стовбур	Кора	Гілки, сучки, коріння
Сосна	0,2 ... 0,7	1,4 ... 2,2	0,3... 0,7
Ялина	0,2	2,3	0,3... 0,4
Береза	0,2 ... 0,4	2,4	0,3... 0,6
Осика	0,2 ... 0,3	2,7	0,3

Вміст внутрішньої золи стовбурової деревини змінюється в межах від 0,2 до 1,17%. На підставі цього відповідно до рекомендацій щодо теплового розрахунку котельних агрегатів за нормативним методом [19, 21, 98, 102, 106–107] в розрахунках паливневих пристроїв величину зольності стовбурової деревини всіх порід приймають рівною 1% сухої маси деревини. Ця рекомендація є справедливою, якщо попадання мінеральних включень у подрібнену стовбурову деревину виключено.

Зольність кори є більшою від стовбурової деревини. Однією з причин цього є те, що поверхня кори в процесі росту дерева обдувається атмосферним повітрям і вловлює водночас мінеральні аерозолі, що містяться в ньому [22].

Зольність кори різних порід на суху масу, за даними [23, 33, 40–42], становить: сосна 3,2%, ялина 3,95%, береза 2,7%, вільха 2,4%.

Зольність елементів крони перевищує зольність деревини і залежить від породи деревини та місця її росту. За даними [24, 32–33, 70–71, 73–74], зольність листя становить приблизно 3,5%. Гілки і сучки мають внутрішню зольність від 0,3 до 0,7%. Проте залежно від типу технологічного процесу заготування деревини їх зольність суттєво змінюється через забруднення їх зовнішніми мінеральними включеннями.

1.2.3 Елементний склад

Деревну біомасу в тому вигляді, в якому вона надходить у паливні котлоагрегатів, називають робочим паливом. Склад деревної біомаси, тобто вміст у ній окремих елементів, характеризується таким рівнянням:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100\%, \quad (1.7)$$

де C^p , H^p , O^p , N^p – вміст у деревній масі, відповідно, вуглецю, водню, кисню та азоту, %;

S^p , A^p , W^p – вміст у паливі, відповідно, золи і води.

З метою характеристики палива в теплотехнічних розрахунках використовують поняття суха маса та горюча маса палива [40, 58, 60–64, 73].

Суха маса палива є в даному випадку біомасою, висушеною до абсолютно сухого стану. Її склад виражається за допомогою такого рівняння:

$$C^c + H^c + O^c + N^c + A^c = 100\%. \quad (1.8)$$

Горюча маса палива – це біомаса, з якої видалені вода та зола. Її склад визначається таким рівнянням:

$$C^g + H^g + O^g + N^g = 100\%. \quad (1.9)$$

Індекси біля знаків компонентів біомаси означають: p – вміст компонента в робочій масі, c – зміст компонента в сухій масі, g – вміст компонента в горючій масі палива [40, 59, 60–63, 73–74, 100–101].

Однією з важливих особливостей стовбурової деревини є стабільність її елементного складу горючої маси.

Елементний склад горючої маси стовбурової деревини майже однаковий для всіх порід. Це видно з даних табл. 1.2, що є узагальненням великої кількості реальних замірів.

Таблиця 1.2

Основні характеристики горючої маси стовбурової деревини [58]

Порода дерев	Елементарний склад деревини, %				Вихід летких на горючу масу, %	Теплота згорання на горючу масу, кДж / кг
	C^g	H^g	O^g	N^g		
Хвойні	51,0	6,15	42,25	0,6	85	19 079
Листяні	50,5	6,10	42,80	0,6	85	18 660
Змішані	51,0	6,10	42,30	0,6	85	18 870

Зазвичай варіювання вмісту окремих компонентів горючої маси стовбурової деревини є в межах похибки технічних вимірювань. На підставі цього в теплотехнічних розрахунках та під час налагоджування паливневих пристроїв, що спалюють стовбурову деревину, тощо, можна без великої похибки приймати такий склад стовбурової деревини (% у горючій масі): $C^r=51\%$, $H^r=6,1\%$, $O^r=42,3\%$, $N^r=0,6\%$.

Елементний склад кори різних порід вивчений недостатньо, позаяк є тільки окремі роботи в цій ділянці, які не дають змоги зробити будь-які широкі узагальнення.

Проводячи аналіз нечисленних даних по елементному складу кори, можна зауважити, що елементний склад і зольність кори різних порід варіюють у таких межах: $C^r=49,0\text{...}58,0\%$; $H^r=5,2\text{...}7,0\%$; $O^r=38,0\text{...}45,9\%$; $N^r=0,5\text{...}8,0\%$.

Дослідження елементного складу гнилої деревини показали, що при корозійному процесі гниття вміст лігніну зменшується, а вміст целюлози майже не змінюється. Прикладами корозійної, або комірчастої гнилі, є гниль сосни від соснової губки і гниль ялини від кореневої губки.

За деструктивного процесу гниття збільшується вміст лігніну і зменшується вміст целюлози. Лігнін містить більше вуглецю, ніж целюлоза, тому вміст вуглецю за деструктивного гниття збільшується, а за корозійного залишається на одному рівні або знижується повільнішими темпами.

Елементний склад частин крони вивчений недостатньо. У табл. 1.3 наводяться дані по елементному складу відходів лісозаготівель [70–74]. Автором виконано дослідження елементного складу деревини, результати яких представлені у розділі 3.

Елементний склад відходів лісозаготівель у розрахунку на масу сухої речовини [32, 47, 59]

Речовина	Q_n^p , кДж/кг	Елементний склад сухої речовини, %			
		C ^c	H ^c	O ^c + N ^c	A ^c
Сосна					
Деревина	20 640	50,78	6,02	42,71	0,49
Кора	20 220	50,02	6,28	40,50	3,2
Хвоя	19 460	49,66	6,72	40,23	3,34
Ялина					
Деревина	20 100	51,81	5,97	41,41	0,81
Кора	20 330	51,09	6,11	38,05	3,95
Хвоя	20 530	49,68	6,31	39,50	4,51
Береза					
Деревина	19 540	49,90	6,37	43,98	0,75
Кора	22 970	52,87	6,68	38,31	2,7
Вільха					
Деревина	19 800	49,92	6,44	43,20	0,44
Кора	22 110	52,13	6,62	38,84	2,41

1.2.4 Теплота згорання деревної біомаси

Під час аналізу процесів спалювання деревної біомаси застосовують поняття вищої та нижчої теплоти згорання. Вища теплота згорання – це кількість тепла, що виділилося під час згорання 1 кг біомаси за повної конденсації усіх парів води, що утворилися при горінні, з віддачею ними тепла, витраченого на їх випаровування (так званої прихованої теплоти пароутворення) [70–74, 91, 104].

Вища теплота згорання Q_B^p визначається за формулою Д. І. Менделєєва (кДж/м³):

$$Q_B^p = 4,187 * (81C^p + 300H_2^p - 26(O^p - S^p)) \quad (1.10)$$

Нижча теплота згорання – кількість тепла, що виділилася при згоранні 1 кг біомаси, без урахування тепла, витраченого на випаровування вологи, яка

утворилася під час згорання цього палива. Її значення визначається за такою формулою (кДж / кг) [17, 30–38, 40, 62]:

$$Q_H^p = 0,339C^p + 1,03H^p - 0,109(O^p - S^p) - 0,25W^p \quad (1.11)$$

Теплота згорання стовбурової деревини залежить від зольності й вологості. Формула для визначення теплоти згорання стовбурової деревини для будь-якої вологості та зольності є такою [70–74]:

$$Q_H^p = 18900 - 214W^p - 189A^p, \quad (1.12)$$

де Q_H^p – теплота згорання стовбурової деревини при вологості W^p і зольності A^p , кДж / кг.

Дослідження теплоти згорання кори різних порід деревини, як зазначалося, дуже нечисленні, відтак можна навести лише орієнтовні значення цього параметра. Для орієнтовних розрахунків можна прийняти такі значення нижчої теплоти згорання кори різних порід деревини в розрахунку на горючу масу, кДж / кг: кора сосни $Q_H^p = 20890$, кора ялини $Q_H^p = 19330$, кора берези $Q_H^p = 19950$, кора осики $Q_H^p = 20780$, кора модрини $Q_H^p = 21\ 870$.

Нижча теплота згорання кори та гнилої деревини різних порід для різної вологості й зольності може бути підрахована за такою формулою:

$$Q_H^p = Q_H^g \left(\frac{100 - W^p - A^p}{100} \right) - 25W^p, \quad (1.13)$$

де – Q_H^p і Q_H^g теплота згорання деревної кори відповідно на робочу і горючу масу, кДж / кг.

Теплота згорання гнилої деревини, віднесена до одиниці маси, у гнилі корозійного типу менше, а у гнилі деструктивного типу більше, ніж у здорової деревини.

Теплота згорання гнилої деревини з різними значеннями зольності й вологості розраховується за тією ж формулою, що і теплота згорання кори.

Теплота згорання елементів крони для наближених розрахунків приймається рівною теплоті згорання стовбурової деревини тієї ж породи [70–74].

1.3 Характеристика та потенціал відходів деревини

За специфікою всі відходи деревного походження поділяються на три головні типи, а саме:

- відходи лісозаготівель і лісосічні відходи – відходи в лісі та відходи з лісного складу;
- відходи після продукційні, котрі утворились у процесі обробки деревини або виготовлення виробів;
- вживана деревина – вживані відходи, які утворилися у результаті використання та викидання тих самих виробів, – тобто вироби із завершеним терміном експлуатації.

Сировину, яку отримує лісозаготівельна промисловість, поділяють на основну та додаткову. Основна деревинна сировина слугує для виготовлення круглих і колотих лісоматеріалів різного призначення, сировини для хіміко-технологічної переробки і деревного палива. На окремих стадіях виробництва лісопродукції частина деревної сировини через низьку товарну цінність не використовується або втрачається у виді відходів. Ця сировина може бути джерелом деревини для переробки в технологічну тріску й іншу цінну продукцію.

У загальній біомасі лісу, що відводиться для вирубування, деревина орієнтовно становить 82%, кора 1 %, деревна зелень 3%. Біомаса в дереві, яке росте, розподілена нерівномірно. Найбільша частка (до 65%) припадає на стовбур, який є основним об'єктом лісозаготівельного виробництва. Верхівкову тонку частину стовбура (до 5%), крону (10–15%), пні (5–10%) і корені (10–20%) як відходи лісозаготівлі залишають на лісосіці. Кількість таких відходів лісозаготівель залежно від породи дерев коливається від 30 до 50% від загальної біомаси.

Відходи лісозаготівельних робіт, за статистичними даними, становлять 21% від усієї маси деревини і близько 14% запасу лісосічного фонду [2–5, 12, 14, 17, 49–57]. Зокрема, до відходів належать:

- відходи крони (деревна зелень – хвоя, листя, гілки, сучки, тонко-мірні верхівки). Їх вихід залежить від породи деревини і коливається від 6%

- (береза) до 14% (сосна) та 18% (ялина) щодо об'єму стовбурної деревини;
- пні та коріння, що залишаються після проведення лісозаготівельних робіт на лісосіці. Пні становлять 3% від об'єму стовбура, коріння – 18% деревини від наземної частини стовбура та крони;
 - хмиз;
 - відходи верхівок і суччя становлять, зокрема: у соснових, кедрових і листяних лісах – 11–14%; у ялинових лісах – 14–17%; у березових, осикових та інших м'яколистяних лісах – 8–10 %; в дубових лісах – 10–20%;
 - відходи у формі козирків та відщепів при обторцюванні і переробці на сортименти у вигляді відкорінків становлять 5,5%.

У лісопромисловому комплексі на кожний щільний кубометр деревини припадає гілок і кори: у ялини – 50–70 кг, у сосни – 80–100 кг, у берези – 90–100 кг. Під час переробки лісових відходів можна одержати від 40 до 55% деревної зелені, 25–35% технологічних трісок, які можна використати як паливо [5, 17].

Якщо взяти круглий ліс за 100%, відходи у лісопильному виробництві становлять у середньому 35%, при виробництві дверних і віконних блоків – 39%, паркету – 30 %, меблів – 48–54%. Отже, з-поміж наявних у деревообробному підкомплексі технологічних процесів найбільш «відходомісткими» є лісопилення та виробництво чорнових і чистових заготовок (дошки становлять 58–60% від об'єму колоди, чорнові заготовки – 35-40% від об'єму дошок, чистові заготовки – 25–35% від об'єму чорнових заготівок), виробництво паркету (придатні планки в багатьох випадках становлять близько 11,7% від об'єму чистових заготовок) [2–5, 12, 14, 17, 49–56].

Потенційним ресурсом та невикористаною базою деревної сировини, запаси якої збільшуються відповідно до розвитку промисловості та господарства загалом, є запаси вживаної деревини.

До таких відходів належать, приміром, розібрані або відремонтовані дерев'яні будівельні конструкції, тара (піддони, ящики), залізничні дерев'яні шпали, стовпи телеграфічні, вживані меблеві вироби тощо.

У вживаній деревині можуть міститися антипірени, антисептики, фарба, лаки, клей, штучні плівки, метал, скло та будь-які інші компоненти. Головним критерієм придатності вживаної деревини, який визначає напрям її подальшого використання, є вміст у ній шкідливих речовин, внесених із сумішами захисту деревини, а також з опоряджувальними сумішами. Отже, використання вживаної деревини вимагає найперше її сортування, що пов'язано з додатковими матеріальними витратами. Тому в умовах української економіки ця група потенційних деревних ресурсів залишається невикористаною.

Наприкінці ХХ ст. цей тип деревних відходів активно аналізують та вивчають [11–14, 17, 49–56]. У деяких із європейських країн здійснено низку досліджень стосовно вивчення можливостей залучення аналізованої деревини у виробництво.

Зокрема, німецьке законодавство в сфері господарювання відходами деревини і вживаними виробами з деревини передбачає: цілковиту заборону складування вживаних виробів з деревини (тара, старі меблі тощо) в першопочатковому не подрібненому стані; сортування деревних відходів і вживаної деревини на сортименти, які є «безпечними» для нової переробки, і для яких виробник має вказати метод їх утилізації; відповідальність власника відходів за їх утилізацію; відшкодування коштів власнику відходів за їх утилізацію; податкові пільги і дотації для організацій, які купують і переробляють на тріску вживану деревину; податкові пільги і доплати для тих, хто використовує тріску з вживаної деревини, однаково застосовуючи її як з технологічною, так і енергетичною метою.

В Австрії обсяги вживаної деревини щорічно можуть становити приблизно 1,0 млн. т. [11–14].

Цей показник для Німеччини був реальним ще 20 років тому, а дані недавніх років стверджують про обсяги від 8,0 млн. т. [11–14, 36–37].

Однак, з погляду на дуже неоднорідний її асортиментний склад, наявність різних забруднень промисловість не виявляє великого зацікавлення цим потенційним джерелом деревної сировини.

Тому вживана деревина й інші промислові деревні відходи зазвичай

потрапляють на смітники. Мільйони тонн деревних відходів знаходяться в багаторічних звалищах. Маса локального накопичення відходів занадто велика для природного потенціалу біодеструкції.

Проте, правила, які запроваджуються в багатьох європейських державах у сфері охорони навколишнього середовища, змушують виробників деревообробної продукції шукати інші способи переробки аналізованого виду сировини.

Із 1 січня 2006 р. у європейських державах вживана деревина маркується як «додаткові обов'язково контрольовані відходи», які можуть експортуватись в інші країни, скажімо, для виробництва плит, деревних гранул.

Отже, промислове використання вживаної деревини є не лише значним збільшенням сировинної бази для деревообробної галузі, а й буде незабаром і необхідністю з екологічних міркувань. Для впорядкування використання лісових ресурсів України необхідно пришвидшити прийняття законів щодо ресурсозбереження і використання вторинних відходів. Ці закони мають ефективно спрямовувати підприємства на екологічно раціональне ресурсоспоживання, а відтак на розробку і застосування маловідходних і безвідходних технологій виробництва.

Якщо ж утворення відходів неминуче, то мають бути передбачені методи їх утилізації. Головним напрямом утилізації відходів є їх використання в інших виробництвах як вторинної сировини для виготовлення нових матеріалів або як енергетичної сировини [2–5].

Значну частину відходів деревинних матеріалів продають приватним особам для опалювання будинків. Така вигідна для підприємств форма звільнення від відходів суперечить основам охорони довкілля, оскільки призводить до неконтрольованого розпорощення небезпечних відходів. Забруднення середовища в цьому разі відбувається через невідповідне застосування відходів. Обрізки ДСП, ДВП і фанери спалюють переважно в неприготованих для цієї мети будинкових печах. За таких умов може настати емісія токсичних речовин, таких як окис азоту, діоксини.

Найдоцільніше спалювати деревні відходи задля отримання тепла й електричної енергії, що значно зменшує витрати на закупівлю енергоносіїв.

1.4 Фракційний склад здрібненої деревної біомаси

Подрібнена деревина та її відходи (паливо), які отримують за допомогою механічної обробки в різних технологічних процесах, характеризується фракційним складом. Фракційний склад – це кількісне співвідношення частинок визначених розмірів до загальної маси здрібненої деревини, тобто це відсотковий вміст частинок заданого розміру в загальній масі. Показник – фракційний склад – використовують у процесі розрахунку вигорання частинок палива, пневмо транспортування, бункеро зберігання, а також у процесі його можливого samozаймання тощо. Визначають цей показник так само, як для вугільного порошку, методом ситового аналізу з примусовим його розсіюванням. Розміри отворів сита коливаються у межах від 20 до 5000 мкм. У ситовому аналізі загальноприйнято, що кількісним показником є залишок частинок палива на ситах з різними розмірами комірки. Повний залишок частинок палива на ситі з розмірами x комірки позначають через R_x , а те, що проходить через сито, – через D . Для цих умов справедливе таке співвідношення:

$$R_x + D = 100 \%. \quad (1.14)$$

Фракційний склад здрібнених відходів деревини, визначений за допомогою ситового аналізу, наведено у табл. 1.5–1.7 [89–90, 100–101].

За результатами ситового аналізу, який виконується з використанням великої кількості сит, визначають параметри « n » і « b », які, відповідно, характеризують ступінь неоднорідності частинок і тонкість їх подрібнення. Параметри « n » і « b » визначають з графічної залежності кривої фракційних залишків $R_x = f(x)$ або аналітично, розв'язавши систему рівнянь, які отримані за методом найменших квадратів:

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N Y_i \ln(X_i) - \sum_{i=1}^N Y_i \cdot \sum_{i=1}^N \ln(X_i)}{N \sum_{i=1}^N \ln^2(X_i) + \left(\sum_{i=1}^N \ln(X_i) \right)^2}, \quad (1.15)$$

$$b = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^N Y_i - n \cdot \sum_{i=1}^N \ln(X_i)}{N} \right), \quad (1.16)$$

де N – кількість сит; $Y_i = \ln(100 / R_i)$; X_i – розмір комірки сита.

Таблиця 1.5

Фракційний склад тирси

Вид тирси	Фракції менше 5 мм, %				
	0 – 0,5 мм	0,5 – 0,8 мм	0,8 – 1,3 мм	1,3 – 2,0 мм	2,0 – 5,0 мм
Дрібна	2	12,4	16,7	24,4	25,5
Крупна	7,6	8,3	20,6	23,8	39,7

Таблиця 1.6

Фракційний склад відходів деревини

Вид відходів деревини	Залишок на ситах, R_x , %			
	10 мм	5 мм	2 мм	1 мм
Здрібнена деревина	7,9	25,5	62,3	4,4
Кора	3,0	6,5	65,5	25

Результати досліджень фракційного складу здрібнених відходів деревини [32, 48, 70–74]

Відходи деревини	<i>n</i>	<i>b</i>
Порох від обробки ДСТП шліфувальними стрічками	1,976	0,52
Порох від обробки ДСТП шліфувальними циліндрами	1,683	0,472
Порох від шліфування фанери (суміш бука і берези)	0,24 – 1,559	0,27 – 327,6
Порох від шліфування фанери (бук)	0,417 – 1,236	1,162 – 191
Тирса: дрібні частинки	1,771	0,0013
грубі частинки	1,326	0,055

На базі цих співвідношень у табл. 1.7 подані результати досліджень фракційного складу здрібнених відходів деревини, а саме, параметри «*n*» і «*b*».

Під час розрахунку системи транспортування палива і процесу горіння подрібнених відходів деревини необхідні такі величини: еквівалентний діаметр частинок, густина, швидкість зависання, укисний природний кут тощо.

Це пов'язано з тим, що частинки деревини у різних технологічних процесах отримують неправильну форму. В розрахунках неправильну форму заміняють діаметром у виді кулі, який еквівалентний частинці за об'ємом:

$$d_{екв} = 1,24 \sqrt[3]{V_{ч}}, \quad (1.18)$$

де $V_{ч}$ – середньоарифметичне значення об'єму однієї частинки заданої фракції.

Її визначають за відомою густиною матеріалу ρ , кількістю частинок N в масі проби G . Тобто за $V = G / N\rho$ [32, 81, 83, 91].

Еквівалентний діаметр також можна визначити за результатами ситового аналізу:

$$d_{екв} = 100 / \sum y_i / \delta_i, \quad (1.19)$$

де y_i – масова частка частинок % в суміші; δ_i – розмір (діаметр) сита, мм.

Якщо розміри частинок визначені експериментально, а форма їх дуже відрізняється від кулі, то еквівалентний діаметр частинки розраховують за таким співвідношенням

$$d_{екв} = \varphi d_k, \quad (1.20)$$

де φ – коефіцієнт форми; d_k – діаметр кулі, об'єм якої еквівалентний об'єму цієї частинки. Для кулеподібних частинок $\varphi = 1,0$; заокруглених – $\varphi = 0,75$; кубічної форми – $\varphi = 0,66$; видовжених – $\varphi = 0,58$; пластинчастих – $\varphi = 0,43$ та інших форм коефіцієнтів наведено в табл. 1.8.

Таблиця 1.8

Значення коефіцієнтів форми

№ п/п	Форма частинки	Коефіцієнт φ
1	Куля	1,00
2	Куб	0,806
3	Призма $a \times a \times 2a$	0,769
4	Призма $a \times 2a \times 2a$	0,757
5	Диск $h = r / 3$	0,595
6	Диск $h = r / 10$	0,33
7	Циліндр $h = 10 r$	0,66
8	Циліндр $h = 20 r$	0,58

Еквівалентний діаметр частинок є вихідним параметром для моделювання процесу горіння здрібненої деревної біомаси. Дані таблиці 1.9 дають змогу врахувати форму частинок біомаси та підвищити точність моделювання процесу горіння біомаси різного складу та якості.

1.5 Способи спалювання деревної біомаси

1.5.1 Спосіб спалювання у шарі

Сутність процесу спалювання твердого палива у шарі полягає в тому, що повітря безперервно продувається через шар палаючого кускового палива, взаємодіє з ним, у результаті чого отримують нагріті до високої температури

паливневі гази, золу і шлак. Паливневі гази омивають поверхні нагріву паливневого простору і передають їм частину свого тепла. Поверхні нагріву паливні сприймають тепло, випромінюване розжареними частинками палива і полум'ям, яке виникає під час згорання горючих газів, що виходять з шару палива. Золу і шлак видаляють із зони горіння або вручну, або за допомогою механічного колосникового пристрою. Простір у паливневому пристрої, де відбувається взаємодія шару палива з повітрям і продуктами згорання, називають активною зоною, або зоною горіння. Активна зона в паливні складається з кисневої зони, зони відновлення, зони сублимації летучих і зони сушіння палива.

Киснева зона – це нижній шар палива, в який підводиться повітря. У газах, що проходять через цей шар, міститься кисень. У цій зоні відбувається взаємодія кисню повітря з вуглецем палива, внаслідок чого утворюється одночасно окис вуглецю CO і вуглекислий газ CO₂. Верхньою межею кисневої зони є переріз шару, в якому температура досягає максимального значення, а вміст кисню стає незначним. Протяжність кисневої зони по висоті шару не залежить від швидкості повітряного дуття і визначається за розміром частинок палива і його природою. Що вища реакційна здатність палива, то менша протяжність кисневої зони, і що більший середній розмір частинки, то більша її протяжність. Якщо за технологією спалювання палива висота шару більша протяжності кисневої зони, то над нею розташовується зона відновлення.

Зона відновлення – це простір, в якому відбувається взаємодія вуглекислого газу CO₂ з поверхнею розжареного палива, в результаті чого у продуктах згорання збільшується вміст окису вуглецю CO. Взаємодія вуглекислого газу з вуглецем палива відбувається з поглинанням тепла, внаслідок чого температура шару по висоті відновної зони зменшується.

Над зоною відновлення розташована зона сублимації летких і сушіння палива. При великій висоті шару вміст горючих компонентів у паливневих газах збільшується і виникає необхідність підведення повітря зверху шару для їх допалювання. Повітря, що підводиться за шаром палива для допалювання горючих компонентів паливневих газів, називають вторинним повітрям.

При занадто малій висоті палива через нього проходить значна кількість кисню, який не вступив у реакцію окислення, що підвищує коефіцієнт надлишку повітря, знижує температуру паливневих газів та тепловіддачу від них до поверхонь нагріву.

Таким чином, режим роботи паливні при шаровому спалюванні може бути двояким. Можна тримати оптимальний по висоті шар палива, рівний протяжності кисневої зони, водночас весь потрібний для горіння кисень продувається через шар палива. Такий режим рекомендується для сухого палива з великою теплою згорання під час використання простої колосникової решітки.

Можна підтримувати більш високий шар палива для того, аби над кисневою зоною були зони відновлення, сублімації летучих і підсушування палива при підведенні вторинного повітря. Цей режим рекомендується для вологого палива з низькою теплою згорання. Паливневі пристрої, що працюють за таким принципом із підведенням вторинного повітря, називають півгазовим. При шаровому паливневому процесі продуктивність паливневого пристрою регулюється зміною тільки одного параметра – кількості повітря, яке подається в паливню.

Перевагами процесу спалювання твердого палива у шарі є:

- можливість спалювання деревної біомаси з найширшим діапазоном розміру частинок;
- можливість найкращої автоматизації роботи паливневого пристрою;
- простота пристроїв для механізації подачі палива в зону горіння;
- мінімальні витрати на підготовку палива.

При шаровому спалюванні частинки палива перебувають у шарі, який дуже повільно рухається по мірі вигорання, і вони зчеплені одна з одною. Швидкість обдування частинок повітрям і продуктами згорання дорівнює швидкості руху цих газів по каналах, утворених зазорами між частинками. Максимальна допустима швидкість газових компонентів при русі їх через шар палива практично лімітована неприпустимістю виносу з шару дрібних частинок з подальшим утворенням прогарів у шарі палива. Протяжність кисневої зони залежить переважно від

середнього діаметра частинок і, підбираючи належно товщину шару, можна забезпечити можливість використання шарового процесу для різного фракційного складу палива. Скажімо, у шахтних паливнях можливо ефективно спалювати і тирсу, і дрова. Непридатний шаровий спосіб для спалювання лише одного виду деревних відходів – шліфувального пилю, розміри частинок якого зазвичай менші 0,5 мм. При спробах спалювання за допомогою шарового способу шліфувального пилю відбувалися спалахи і вибухи його в паливневому об'ємі та газовому тракті котлоагрегатів.

З огляду на це, спосіб спалювання деревної біомаси у шарі палива забезпечує хороші умови для автоматизації паливневих пристроїв. Справді, при автоматизації шарових паливень достатньо забезпечити автоматичне регулювання кількості повітря, яке подається у паливню, тоді як при інших типах паливневих процесів потрібне автоматичне регулювання не лише кількості повітря, а й кількості палива, що ускладнює систему автоматизації. При шаровому процесі спалювання деревного палива пристрій механізації подачі палива в паливню, по суті, складається з конвеєра або паливного рукава, заповнюваних періодично паливом, тобто гранично простим. Витрати на підготовку палива при шаровому процесі є мінімальними – дрібні деревні відходи можна спалювати в їх природному вигляді. Підготовка кускових відходів для спалювання зводиться лише до їх подрібнення такою мірою, щоб вони вільно, без застрявання проходили через паливні рукави і нормально зсувалися у шахтах паливних пристроїв.

Проте шаровий спосіб спалювання палива має і негативні сторони. По-перше, при шаровому способі потрібна громіздка колосникова решітка, що не вписується при великій потужності в габарит котлоагрегату. По-друге, мають місце в деяких випадках прогари шару і кратерне горіння, що лімітує напруженість роботи колосникових решіток не настільки високими межами, як це було бажано при конструюванні паливень великої потужності.

1.5.2 Вихоровий спосіб спалювання

Вихоровий процес спалювання твердого палива полягає в тому, що всередині

об'єму паливні створюється стійкий вихровий обертальний рух газоповітряної суміші і частинок палива, які рухаються по кругових або петльових траєкторіях, перебуваючи в підвішеному стані і згораючи при русі в газовому об'ємі. Велика швидкість руху частинок і їх розвинена поверхня створюють умови для пришвидшеного перебігу процесів нагрівання, підсушування, сублімації летких і згорання частинок, що витають у паливневому об'ємі. Для спалювання окремих великих частинок вихрові паливні забезпечуються допалювальними колосниковими решітками.

Вихоровий рух газоповітряної суміші досягається відповідним підведенням повітряного дуття і відведенням продуктів горіння. Вихровий рух організовується так, що найбільш великі частинки палива потрапляють періодично в ділянку, де газоповітряна суміш або повітря рухаються з великою швидкістю, підхоплюються ними і знову виносяться в паливний об'єм. Цей цикл повторюється доти, доки частки палива, поступово обгораючи, не досягнуть розмірів, що забезпечують їх повне згорання за один виток руху газоповітряної суміші.

При вихоровому способі спалювання палива не потрібно дуже тонко подрібнювати його. Вихоровий процес дає змогу спалювати кам'яне вугілля з розмірами частинок 0.5 ... 3 мм, фрезерний торф тощо. Чимало видів деревних відходів, скажімо тирса, стружки, можуть спалюватися за допомогою цього способу без додаткового подрібнення.

Проте при всіх процесах спалювання дрібного палива у зваженому стані мати на увазі, що інтенсивність масо- і теплообміну між газовим середовищем і поверхнею зважених часток визначається не абсолютною швидкістю їх руху, а швидкістю руху частинок щодо газового середовища, яка при рівномірному русі не може перевищувати швидкості витання частинок середовища в газовому об'ємі й обмежена, таким чином, не настільки високими для дрібних частинок межами. На відміну від способу спалювання у шарі, застосування вихорового процесу пов'язане з необхідністю при зміні теплопродуктивності паливні регулювати і кількість підведеного повітря, і кількість палива, що подається у паливню. Ця обставина ускладнює автоматизацію роботи паливневих пристроїв вихорового типу.

1.5.3 Циклонний спосіб спалювання

Циклонний спосіб спалювання твердого пилоподібного палива за своїм принципом аналогічний вихоровому процесу, але відрізняється тим, що об'єму паливненого простору надається циліндрична форма, а підведення повітря здійснюється по дотичній до циліндричної поверхні внутрішнього об'єму паливни.

1.5.4 Факельний спосіб спалювання

Факельний процес спалювання пилоподібного палива полягає в тому, що пилепоповітряна суміш подається через пальник у паливневий об'єм і згорає у зваженому стані, утворюючи факел яскравого полум'я.

Для забезпечення стійкості палаючого факела частинки палива повинні попередньо подрібнюватися до таких розмірів, щоб повністю згоріти в короткий час перебування їх в об'ємі факела. Тому спалювати у факелі можна лише паливо з високим ступенем подрібнення. Практично без додаткового подрібнення у факелі можна спалювати лише шліфувальний пил.

Особливістю факельного процесу є доволі не значний запас палива в паливневій камері, завдяки чому спосіб спалювання малостійкий і досить чутливий до зміни режиму. Регулювати потужність паливни можна лише одночасною зміною кількості поданих у паливню палива та повітря. При факельному способі спостерігається золотий знос поверхонь нагріву, наростання на цегляних стінках паливни твердого сплавленого шлаку. Факельний процес вимагає точного дотримання заходів вибухобезпеки.

1.6 Паливневі пристрої для спалювання деревної біомаси

1.6.1 Паливні зі спалюванням у шарі

У паливнях зі спалюванням палива у шарі головними трудоемними робочими процесами є завантаження палива на решітку, прошрування (просування, розрівнювання) шару палива, видалення шлаку.

Залежно від ступеня механізації цих процесів є паливні з ручним обслуговуванням, паливні з частковою механізацією та механічні шарові паливні. Раніше у невеликих котельних установках, устаткованих котлами потужністю до 10 т пари на годину, застосовувалися майже виключно шарові паливні з ручним обслуговуванням. Недавнім часом у цих установках широко використовуються паливні з частковою або комплексною механізацією трудомістких процесів.

Широке застосування паливні такого типу в малих установках пояснюється простотою, надійністю і дешевизною, універсальністю щодо можливості спалювання різноманітних видів твердого палива, високою стійкістю горіння.

Решітка паливні складається з 4-х рядів нерухомих колосників, на яких лежить паливо. Колосники виготовляють або у виді чавунних плиток (плиткові), або у виді брусків (брускові, балочні). У зольник (піддувало) вентилятором нагнітається повітря, яке крізь отвори або щілини в колосниках і між ними, тобто крізь живий переріз решітки, надходить у шар палива. Нині застосовують колосникові решітки з малим перерізом, що становить менш 15% площі решітки. Над решіткою розміщений паливний простір, а над ним – променесприймальна поверхня нагріву. Свіже паливо вручну закидається на шар гарячого палива через завантажувальний (шурувальний) отвір. Шлак видаляється в зольник, для чого установлюється декілька перекидних (поворотних навколо горизонтальної осі) колосників.

Ручні горизонтальні паливні мають чимало недоліків: потребують застосування важкої фізичної праці для обслуговування; працюють періодично; мають невисокий ККД; через обмежену довжину колосникових решіток утруднюється можливість їх застосування навіть під невеликими котлами; при одиничній продуктивності (понад 5 т пари на годину) обмежена питома потужність решітки; висока чутливість до фракційного складу палива (за розмірами кусків); низька продуктивність і економічність під час роботи на дрібнодисперсному паливі; працюють із підвищеним коефіцієнтом надлишку повітря в паливні.

Ці недоліки настільки істотні, що нині відмовляються від застосування у невеликих установках горизонтальних паливень з ручним обслуговуванням і дедалі

ширше застосовують паливні з частковою або повною механізацією трудомістких процесів спалювання.

1.6.2 Шахтні паливні

Для спалювання кускового торфу в невеликих котельних агрегатах застосовуються шахтні паливні з похилим дзеркалом горіння. Колосникова решітка шахтної паливні складається з двох рядів похилих і двох рядів горизонтальних колосників. Торф завантажують з вагонетки великими порціями в паливний бункер, звідки він надходить у шахту, розміщену над колосниковою решіткою. В міру вигорання торфу і видалення (з нижнього горизонтального ряду колосників) вогнищевих залишків торф з шахти надходить на колосникову решітку і просувається вздовж похилих колосників під впливом сили тяжіння.

У шахтних паливних, як і взагалі в паливних з похилим дзеркалом горіння (похилих, східчастих), стадії горіння палива поділені по місцю: у верхній частині відбувається теплова підготовка, в середній – горіння коксу, а в нижній – допалювання. Обслуговування шахтних паливень потребує менших фізичних зусиль персоналу порівняно з обслуговуванням ручних горизонтальних паливень.

1.6.3 Паливні з шурувальною планкою

Головним елементом паливень цього типу є нерухома плоска колосникова решітка, вздовж якої пересувається паливо. Рух палива відбувається за допомогою клиновидної планки, яка періодично переміщується через певні проміжки часу, установлені поперек колосникового полотна. Швидкість ходу планки регулюється, водночас задається програма чергування ходів певної довжини (коротких і довгих). Під час руху планки відбувається підкидання у шар свіжого палива, прошаровування шару і видалення шлаку. Паливні з шурувальною планкою можуть застосовуватися для спалювання кам'яного і бурого вугілля в котлоагрегатах з невеликою продуктивністю (до 10–12 т пари на годину).

1.6.4 Паливні з ланцюговими решітками

Найпоширенішими механічними шаровими паливнями є паливні з ланцюговими решітками.

Ланцюгова решітка – це колосникове полотно, що рухається разом із паливом, яке є на ньому. Основою ходової частини ланцюгової решітки є два або декілька ланцюгів, що несуть на собі колосники. Залежно від способу кріплення колосників розрізняють бімсові та безбімсові, або безпровальні решітки.

Нині серійно виробляють лише решітки безпровального типу (БЛР – безпровальні ланцюгові решітки). Решітка БЛР порівняно з бімсовою значно легша й дешевша, надійніша та економічніша в експлуатації. Решітки потрібного розміру складаються із стандартних серійно виготовлених секцій.

У передній частині решітки встановлено відсічний охолоджувальний шибер для регулювання товщини шару палива. В кінці ланцюгової решітки установлюється шлакознімач.

Конфігурація паливневих камер у паливнях із ланцюговими решітками в основному схожа до паливень, в яких спалюють різні види палива. Вона характеризується наявністю низького і довгого заднього склепіння і відносно високо розміщеного короткого переднього склепіння.

Заднє склепіння спрямовує потік гарячих газів у зону надходження свіжого палива, що сприяє його загоранню. Переднє склепіння добре прогрівається паливними газами, не закриває від випромінюючих твердих частинок і газів зону попередньої підготовки палива і сприяє стабілізації високої температури в передній частині решітки. Звуження паливневої камери, утворене переднім і заднім склепіннями, і рух під заднім склепінням газового потоку у напрямі до фронту паливні сприяють перемішуванню паливневих газів, горінню винесених із шару твердих частинок і горючих газів і утворенню зони високих температур.

За нормальної роботи паливні ланцюгова решітка рухається безперервно. Режим роботи регулюють зміною товщини шару палива (деревини) на решітці за допомогою шибера (регулятора шару), зміною швидкості переміщення решітки і

відповідним режимом тяги і дуття. Регулювання повітряного режиму паливні полягає в підтримуванні потрібного тиску повітря під різними ділянками решітки (4–5 зон по довжині решітки).

Діапазон продуктивності котлоагрегатів, в яких можуть установлюватись ланцюгові решітки, доволі широкий. У разі потреби в котлоагрегаті встановлюють дві решітки.

Ланцюгові решітки дають змогу механізувати подачу палива в паливню і видалення шлаку, але не забезпечують прошуровування і розрівнювання шару палива. Цей основний їх недолік пояснюється тим, що паливо, яке надходить на решітку, повільно рухається разом з решіткою і не має жодних відносних переміщень.

Найефективніше паливні з ланцюговою решіткою працюють на твердому паливі з розмірами фракцій від 6 до 25 мм. У цьому разі ККД паливні високий (91–94%).

З цієї ж причини (непрошуровування шару) паливні з ланцюговою решіткою працюють з погіршеними показниками при спалюванні високозольного палива. В них можна спалювати паливо із зольністю на суху масу палива A_s до 15–20%. Паливні з ланцюговою решіткою без спеціального додаткового обладнання непридатні для спалювання високовологого палива.

1.6.5 Паливні з перештовхувальними решітками

Є три групи перештовхувальних решіток: похило-перештовхувальні, каскадні та зворотно-перештовхувальні. Колосникове полотно похило-перештовхувальних решіток складається з рухомих і нерухомих колосників, які чергуються між собою по довжині; в кінці решітки установлюються великі шлакові колосники. Рухомі колосники рухаються зворотно-поступально і переміщують та прошуровують шар палива. Хід колосників невеликий – до 100 мм. У паливнях цього типу можна спалювати паливо з підвищеною зольністю до $A = 30–35\%$ [20, 32–33, 48].

Каскадні і зворотно-перештовхувальні паливні відрізняються великим ходом колосників – до 400 мм і, внаслідок цього, інтенсивним прошуровуванням шару, що дає можливість спалювати в таких паливнях високозольне паливо із зольністю $A = 50\%$ при високій тепловій нарузі дзеркала горіння. Проте автоматизація в цих паливнях коштує надто дорого – ускладнюється конструкція, колосники виготовляють з хромистого чавуну, підвищуються витрати на ремонт тощо.

1.6.6 Камерні (факельні) паливні

Найпоширенішими є камерні (факельні) паливні. Вони широко застосовуються в енергетичних котлоагрегатах великої та середньої потужності для спалювання різних видів твердого палива, а також деревних відходів.

Камерні паливні поділяють на паливні із киплячим шаром, факельні та вихорові.

У паливнях із киплячим шаром дрібнозернисті частинки твердого палива вводяться у нижню частину камери і піднімаються догори за рахунок енергії струменя повітря. Під час руху палива в умовах дуже інтенсивного масообміну відбувається його реакція з окислювачем. Фонтануючий шар доцільно використовувати лише у паливнях невеликої потужності.

Спалювання в киплячому / циркулюючому шарі дає змогу досягти більшої ефективності й економічності за рахунок майже 100% -го згорання палива при меншому рівні емісії продуктів горіння порівняно з прямим спалюванням. Метод спалювання в киплячому шарі застосовується в комерційних або муніципальних котельнях і ТЕЦ у діапазоні потужностей від 5 до 600 МВт для отримання електричної та теплової енергії. Додатковою перевагою цього методу є можливість спалювання різних видів палива, включаючи низькосортне вугілля, торф, тверді побутові відходи, відходи целюлозно-парової промисловості тощо.

У факельних паливнях спалювання палива відбувається у потоці, що перевищує швидкість витання частинок палива. Останні стають завислими у газоповітряному потоці і починають переміщуватися із потоком, згоряючи під час

руху в межах паливного об'єму. Водночас згорання палива має бути забезпечене у межах паливного об'єму. Тому паливо піддають попередній обробці (тверде паливо подрібнюють до пилоподібного стану, рідке – розпилюють у дрібнодисперсному стані, газоподібне – добре перемішується із окислювачем) [20, 32–33, 48].

Тонкість подрібнення твердого палива характеризується залишком $R\%$ (у процентах від початкової наважки) на ситах певного розміру. Найчастіше для визначення тонкості помолу застосовують сито № 70, з отвором 88 мк. Для кожного виду палива визначається тонкість помолу, яка відповідає мінімумові експлуатаційних витрат. Водночас враховується, з одного боку, економія палива, яку дає тонкий помел, з іншого – витрати енергії на розмелювання. Основною характеристикою палива, що визначає оптимальну тонкість помолу, є вихід летких речовин. Що він менший, то тонший повинен бути помол. При спалюванні палив із великим виходом летких речовин можна допускати залишок R_{88} , що становить 50% і більше.

Час перебування частинок твердого палива в камерних (факельних) паливнях дуже обмежений. Щоб повністю спалити їх у такий короткий проміжок часу, слід подрібнювати паливо до пиловидного стану. Внаслідок подрібнення досягається також багаторазове збільшення вільної поверхні палива (поверхні реагування), вираженої в $\text{м}^2/\text{кг}$, що сприяє організації і перебігу процесів горіння.

Паливні з факельним способом спалювання можуть бути однокамерні або багатокамерні. Однокамерні паливні характеризуються несприятливою структурою золотого балансу. З паливні з продуктами горіння виносяться у виді легкої золи в середньому 85% золи палива. Це призводить до золотого зносу і засмічення поверхонь нагріву, обмежується швидкість газів у конвективних елементах, що зумовлює зниження коефіцієнта теплопередачі в них, викликає потребу в громіздкому золотловлювальному обладнанні [109].

У багатокамерних паливнях спалювання здрібненої деревини відбувається у паливні з вторинною камерою допалювання для ефективнішого розподілу теплових потоків, а також створення додаткового завихрення спалюваної деревної

суміші, що забезпечує ефективніше спалювання. Ця схема спалювання вигідна з експлуатаційного погляду, тому що забезпечується більш ефективно та повне спалювання, що, своєю чергою, дає змогу зменшити вміст NO_x у димових газах. А це, своєю чергою, сприяє поліпшенню екологічного стану довкілля. Використання паливень указаної конструкції дасть змогу підвищити ефективність роботи завдяки інтенсифікації спалювання деревної біомаси та вирішити проблему утилізації відходів деревообробного виробництва. Більш повніше спалювання стабілізує температурні характеристики палива, зменшить динаміку шлакування паливни, а також витрати електроенергії на власні потреби. У багатьох деревоспалювальних котлоагрегатах встановлюють паливні цього типу.

У циклонних паливнях досягається найбільша швидкість спалювання. На відміну від спалювання у прямотоковому потоці (факельний процес), при циклонному методі спалювання частинка палива циркулює по організованому контуру потоку стільки разів, скільки необхідно для її повного згорання. Циркуляція повітря (окислювача) у паливні досягається тим, що при введенні потоку в паливневому об'ємі утворюється коаксіальний вихор, що втягує паливо у циркуляційний рух.

У вихорових паливнях частинки твердого палива мають розміри 2...5 мм і вище. Процес може йти із рідким шлаковидаленням із ступенем уловлювання 80...90 % золи палива.

Висновки до розділу 1

За результатами аналізу літературних джерел, що стосуються процесів отримання подрібненої деревної біомаси та її спалювання, отримано такі висновки та сформовано завдання для досліджень:

- 1) виконано аналіз особливостей процесу спалювання здрібною деревною біомаси, її фракційного складу, теплоенергетичних характеристик, що є важливими для розроблення паливневих пристроїв;
- 2) встановлено, що відходи деревини є важливим сировинним джерелом, що за умови належної підготовки (підсушування та здрібнення) може

забезпечити енергетичну цінність близьку до енергетичної цінності паливної деревини;

- 3) виконано аналіз паливних пристроїв та встановлено, що для спалювання здрібненої деревної біомаси доцільно застосовувати паливні камерного типу, які дають можливість спалювати здрібнену суміш різних фракцій, зокрема і пилоподібної, та отримувати високий коефіцієнт корисної дії;
- 4) час перебування частинок твердого палива в камерних (факельних) паливнях дуже обмежений, тому необхідно дослідити кінетичні параметри процесу горіння а також удосконалити математичну модель процесу горіння здрібненої деревної біомаси та застосувати її для аналізу процесу горіння у камерних паливнях;
- 5) встановлено, що камерні паливні мають низку недоліків, зокрема, втрати теплоти від механічного недопалу під час спалювання поліфракційних палив і значна кількість утвореного NO_x , недостатній час перебування частинок палива у об'ємі паливнєвої камери (характерно для однокамерних паливень) і, як наслідок, винос частинок палива, що не згоріли; ці недоліки потрібно усунути для підвищення їх енергоефективності для чого слід удосконалити конструкцію таких паливних пристроїв.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ ЗДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ

2.1 Розв'язок нестационарної задачі теплового самозапалювання

Насамперед розглядаємо процес горіння подрібненої деревної біомаси у паливневій камері. Розраховуючи вихід і вигорання летких для кінетичних констант k_0 і E , приймемо їх ефективні значення.

Розвиток процесу самозаймання супроводжується зміною по довжині камери трьох параметрів: росту температури, зменшення концентрацій деревинних частинок і кисню. Цим умовам і моделям реагування відповідає математична модель у виді системи із таких рівнянь, як тепловий баланс реагуючої суміші, матеріальний баланс із витрат кисню та подрібнених деревинних частинок [71–75, 81–83].

З рівняння теплового балансу реагуючої суміші

$$dQ_p - dQ_n - dQ_T = 0, \quad (2.1)$$

видно, що теплота, яка виділяється під час хімічного реагування суміші в елементарному обсязі dQ_p , витрачається на нагрівання суміші dQ_n і частково виділяється через стінки dQ_T в навколишнє середовище.

У разі рівномірного розподілу частинок подрібненої деревини в паливо-повітряній суміші для тепловиділення в елементарному об'ємі на ділянці камери dx можна записати вираз:

$$dQ_p = \beta k_0 e^{-E/RT} C \mu \frac{273^2}{T^2} f Q \frac{\pi d^2}{4} dx, \quad (2.2)$$

де k_0 – передекспоненційний множник, s^{-1} ; β – стехіометричний коефіцієнт; E – енергія активації, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$; $R = 8,314$ – універсальна газова стала, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$; T – поточна температура суміші, К; C і μ – поточні значення концентрації кисню

та деревинних частинок, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ для тиску 0,1013 МПа і температури 20°C; f і Q – питома площа поверхні та теплота згорання деревинних частинок, $\frac{\text{м}^2}{\text{кг}}$ і $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; d – діаметр камери, м.

Перейшовши у виразі (2.2) до безрозмірних концентрацій кисню і палива, а також температури:

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

одержимо

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

Витрата теплоти на нагрівання суміші становить:

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

де $V_{cm} = W \frac{\pi d^2}{4} \frac{273}{T} = W_0 \frac{\pi d^2}{4}$ – секундна витрата суміші, $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$; $c_{cm} = (c_n + \mu_0 c_d)$, c_{cm} , c_n , c_d – відповідно теплоємності суміші, повітря, $\frac{\text{кДж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{К})}$, теплоємність деревинних частинок, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$; W_0 – швидкість, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ при 0°C.

Підставивши у рівняння (2.5) вираз для об'єму і теплоємності суміші, після переходу до безрозмірної температури:

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

Кількість відведеної теплоти на ділянці камери довжиною dx пропонуємо визначати за формулою

$$dQ_T = \alpha_c (T - T_1) \pi d dx,$$

де α_c – коефіцієнт тепловіддачі через стінку камери, $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; T_1 – температура стінок камери згорання, К.

Перейшовши до безрозмірних температур, одержимо:

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

Підставивши вирази (2.4), (2.6) і (2.7) у рівняння (2.1), розділивши на комплекс постійних величин першого його доданку й віднісши до одиниці об'єму суміші, отримаємо рівняння теплового балансу реагуючої суміші в безрозмірному вигляді [100–101]:

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

у якому

$$\chi = x \frac{\beta k_0 C_0 \mu_0 f Q 273^2 R^3}{W_0 (c_n + \mu_0 c_d) E^3} - \text{безрозмірна координата};$$

$$\Omega = \frac{4\alpha_c E^3}{273^2 \beta k_0 C_0 \mu_0 f Q R^3 d} - \text{безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі}.$$

Рівняння матеріального балансу з урахуванням витрати кисню (який подається в складі повітря) та частинок подрібненої деревини прирівнюється його витраті на хімічне реагування:

$$\frac{d}{dx} \left(W \frac{\pi d^2}{4} C \right) = K_s^{O_2} \mu f \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2.9)$$

У цьому рівнянні питома швидкість реагування частинок деревини по кисню дорівнює:

$$K_s^{O_2} = k_0 e^{-\frac{E}{kR}} C. \quad (2.10)$$

Підставивши у вираз (2.9) $K_s^{O_2}$ з виразу (2.10) і переходячи до безрозмірних температур та величин концентрацій кисню і деревинних частинок, а також з огляду на те, що зі стехіометричного співвідношення між витратою палива і кисню

$$\beta = \frac{1}{V^0 C_0}, \text{ звідси } C_0 = \frac{1}{\beta V^0}:$$

$$W_0 \frac{1}{\beta V^0} \frac{d\bar{C}}{d\chi} = \frac{R^2}{E^2} k_0 C_0 \mu_0 f Q 273^2 \bar{C} \bar{\mu} e^{-\frac{1}{\Theta}}, \quad (2.11)$$

де V^0 – теоретично необхідна кількість повітря, $\frac{m^3}{kg}$.

Розділивши рівняння (2.11) на комплекс сталих величин правої його частини, згодом, доповнивши знаменник до величини χ множенням і діленням

його на комплекс $\frac{QR}{(c_n + \mu_0 c_d)E}$, отримаємо друге диференціальне рівняння у виді:

$$\frac{d\bar{C}}{d\chi} = \frac{1}{\Theta_{a0}} \bar{C} \bar{\mu} \frac{1}{\Theta^2} e^{-1/\Theta}, \quad (2.12)$$

у якому $\Theta_{a0} = \frac{QR}{(c_n + \mu_0 c_d)E}$ – безрозмірна адиабатна температура суміші подрібнених деревинних частинок і повітря за початкової температури $t = 0^\circ\text{C}$.

Третє рівняння у системі диференціальних рівнянь математичного моделювання процесу самозагоряння можна отримати з рівняння матеріального балансу витрат частинок подрібненої деревної біомаси. Але простіше для цього звернутися до рівняння зв'язку між пропорційними кількостями витрати частинок деревини та кисню під час хімічного реагування. Цей зв'язок виражається рівнянням:

$$(\mu_0 - \mu) = \beta(C_0 - C). \quad (2.13)$$

Переходячи до безрозмірних концентрацій, запишемо:

$$\mu_0(1 - \bar{\mu}) = \beta C_0(1 - \bar{C}). \quad (2.14)$$

Підставивши в (2.14) такі співвідношення:

$\mu_0 = \frac{1}{\alpha V^0}$ і $\beta = \frac{1}{V^0 C_0}$, одержимо третє рівняння системи:

$$\bar{\mu} = 1 - \alpha(1 - \bar{C}). \quad (2.15)$$

Запишемо систему диференціальних рівнянь (2.8), (2.12) і (2.15) математичного моделювання самозаймання у безрозмірному вигляді сукупно [81–82, 85, 100–101]:

$$\begin{aligned} \bar{C} \bar{\mu} \frac{1}{\Theta^2} e^{-1/\Theta} - \frac{d\Theta}{d\chi} - \Omega(\Theta - \Theta_1) &= 0; \\ \frac{d\bar{C}}{d\chi} &= \frac{1}{\Theta_{a0}} \bar{C} \bar{\mu} \frac{1}{\Theta^2} e^{-1/\Theta}; \\ \bar{\mu} &= 1 - \alpha(1 - \bar{C}) \end{aligned} \quad (2.16)$$

2.2 Дослідження процесу самозапалювання з врахуванням тепловідведення

Під час розвитку процесу самозагоряння витрата кисню та деревинних частинок є невеликою. Тоді система диференціальних рівнянь (2.16) може бути зведена до одного рівняння [100–101]:

$$\frac{1}{\Theta^2} e^{-1/\Theta} - \frac{d\Theta}{d\chi} - \Omega(\Theta - \Theta_1) = 0 \quad (2.17)$$

Початкова умова для розв'язування цього рівняння: для $\chi = 0$, $\Theta = \Theta_1$.

У рівнянні (2.17) не містяться константи та параметри, котрі описують властивості палива. Тому це рівняння є універсальним і може бути використане для дослідження самозаймання палив, які належать до різних видів, із урахуванням тепловідведення від камери.

Проаналізуємо реакцію між паливною сумішшю і киснем як реакцію другого порядку, беручи до уваги те, що у період займання можна знехтувати витратою горючого газу і кисню, рівняння теплового балансу аналогічно (2.1) для елементарної ділянки камери в розгорнутому вигляді можна представити як:

$$k_0 e^{-E/RT} C_2^0 C_{O_2}^0 \left(\frac{273}{T} \right)^2 Q \frac{\pi d^2}{4} dx - W \frac{\pi d^2}{4} \frac{273}{T} c_{cm} \frac{dT}{dx} dx - \pi d \alpha (T - T_1) dx = 0, \quad (2.18)$$

де C_2^0 і $C_{O_2}^0$ – концентрації паливного газу і кисню, $\text{кг}/\text{м}^3$, за тиску 0,1013 МПа та температури 20°C; T_1 – початкове значення температури суміші та рівна їй температура стінок паливневої камери, К; Q – теплота згорання суміші, $\text{кДж}/\text{кг}$; W – швидкість руху суміші у камері, $\text{м}/\text{с}$; c_{cm} – теплоємність суміші, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; d – діаметр камери, м; α – коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки, $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Відносячи рівняння (2.18) до одиниці об'єму:

$$k_0 e^{-E/RT} C_2^0 C_{O_2}^0 \left(\frac{273}{T} \right)^2 Q - \varpi_0 c_{cm} \frac{dT}{dx} - \frac{4\alpha}{d} (T - T_1) = 0, \quad (2.19)$$

де w_0 – швидкість потоку, m/c (за тиску 0,1013 МПа і температури 0°C).

Початкова умова: для $x = 0$, $T = T_1$.

Переходячи до безрозмірних температури, координати та коефіцієнта тепловіддачі, одержимо рівняння аналогічне рівнянню (2.17), маючи відмінність лише в безрозмірних координаті й коефіцієнті тепловіддачі.

Прийнявши в рівнянні (2.17) $\Omega = 0$, отримаємо рівняння для адіабатних умов в такому вигляді:

$$\frac{d\Theta}{d\chi} = \frac{1}{\Theta^2} e^{-1/\Theta}. \quad (2.20)$$

Отже, з розв'язку рівняння в безрозмірних координатах:

$$\Theta = \Theta(\chi, \Theta_1), \quad (2.21)$$

можна отримати розв'язок нестационарної задачі про самозаймання будь-якого палива для будь-яких режимних умов.

Для розв'язання рівняння (2.20) застосовується числовий метод інтегрування на обчислювальній машині.

Використовуючи зазначене, здійснено дослідження самозаймання для суміші подрібненої деревної біомаси (осика, вільха, верба *Salix...*) [71–75, 101]. Виконано дослідження математичної моделі процесу самозаймання за допомогою ППП MathCad [64]. Результати проведених розрахунків і графічні залежності подано у Додатку 1.

2.3 Підхід на основі неізотермічного методу до визначення кінетичних констант процесу спалювання деревної біомаси

Науковці здійснили ґрунтовне дослідження кінетики процесів, що відбуваються у гомогенних системах. Що стосується кінетики гетерогенних процесів, то це питання вивчено недостатньо. Результати вивчення цього процесу наведено в окремих оглядових статтях і монографіях [71–75]. Як відомо, топохімічні реакції є різновидом гетерогенних процесів, кінетику яких переважно здійснюють в ізотермічних умовах, а це є доволі складним завданням. Удосконалення лабораторної техніки для вивчення широкого класу гетерогенних реакцій зумовило те, що нині дедалі частіше застосовують неізотермічні методи дослідження, а саме: термогравіметрію (TG), диференційну термогравіметрію (DTG) та диференційний термічний аналіз (DTA).

З-поміж найінформативніших методів дослідження процесу спалювання деревної біомаси є метод диференційної термогравіметрії. Цей метод, як відомо, полягає в безперервному зважуванні взірця палива у процесі його нагрівання. Він дає змогу оцінити термохімічний процес перетворення палива за допомогою низки параметрів, а також кількісно оцінити кінетику термічного розкладання, застосовуючи математичну обробку експериментальних залежностей врати маси (ТГ) і швидкості втрати маси (ДТГ) з часом [65–67, 85].

Суть неізотермічного методу полягає у записуванні на дериватографі кривої зміни маси ТГ (ДТГ) в умовах лінійного підйому температури взірця (у тиглі).

Під час вивчення термоокисної деструкції за допомогою методу динамічного термогравіметричного аналізу (ДТГА) зазвичай застосовують для опису кінетики процесу таке рівняння [65–67, 85]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k * (1 - \alpha)^n, \quad (2.22)$$

де k – константа швидкості реакції; α – ступінь розкладу речовини за певної температури, n – порядок реакції.

Константа швидкості реакції k виражається співвідношенням:

$$k = z * e^{-\frac{E}{RT}} \quad , \quad (2.23)$$

де z – передекспоненційний множник; E – енергія активації.

Підставивши вираз (2.23) в (2.22) одержимо:

$$\frac{d\alpha}{dt} = z * e^{-\frac{E}{RT}} * (1 - \alpha)^n . \quad (2.24)$$

Для зручності обробки експериментально отриманої кривої степінь розкладу α може бути поданий у виді:

$$\alpha = \frac{W}{W_k}; \quad d\alpha = \frac{dW}{W_k},$$

де W – втрата маси за температури T протягом деякого інтервалу часу, мг;

W_k – сумарна втрата маси в кінці реакції, мг.

Тоді рівняння (2.24) матиме вигляд:

$$\frac{d\left(\frac{W}{W_k}\right)}{dt} = z * e^{-\frac{E}{RT}} * \left(1 - \frac{W}{W_k}\right)^n . \quad (2.25)$$

Вводимо в розгляд величину q , яка характеризує зміну температури в часі за допомогою співвідношення

$$q = \frac{dT}{dt} . \quad (2.26)$$

Введення такого параметру зумовлене тим, що експеримент здійснюється на апаратурі такого типу, де головним параметром, котрий характеризує перебіг процесу, є температура.

Тому від головного кінетичного рівняння термоокисної деструкції, використовуючи (2.26), переходимо до такого рівняння:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{z}{q} * \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) * (1 - \alpha)^n . \quad (2.27)$$

У запропонованому варіанті розрахунку найбільші труднощі виникають під час визначення всіх трьох параметрів одночасно, але цю обставину можна подолати, застосовуючи метод найменших квадратів. Якщо врахувати, що логарифмічна форма виразу (2.27) має вигляд:

$$\begin{aligned} \ln \frac{d\alpha}{dT} &= \ln \frac{z}{q} - \frac{E}{RT} + n * \ln(1 - \alpha) \\ \ln \frac{dW}{W_k dT} &= \ln \frac{z}{q} - \frac{E}{RT} + n * \ln\left(1 - \frac{W}{W_k}\right), \end{aligned} \quad (2.28)$$

який, свою чергою, можна представити лінійним рівнянням виду

$$\Omega = ax + by + c. \quad (2.29)$$

Зіставляючи (2.28) і (2.29), матимемо:

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

$$a = \frac{-E}{R}; \quad b = n; \quad c = \ln \frac{z}{q}. \quad (2.30)$$

Тоді система рівнянь методу найменших квадратів для (2.28) набуде такого вигляду:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^N x_i^2 + b \sum_{i=1}^N x_i y_i + c \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N x_i D_i; \\ a \sum_{i=1}^N x_i y_i + b \sum_{i=1}^N y_i^2 + c \sum_{i=1}^N y_i = \sum_{i=1}^N y_i D_i; \\ a \sum_{i=1}^N x_i + b \sum_{i=1}^N y_i + cN = \sum_{i=1}^N D_i. \end{cases} \quad (2.31)$$

Висновки до розділу 2

У розділі розроблено основи методики розрахунку кінетичних констант (енергії активації та передекспоненційного множника) процесів термічного розкладання деревної біомаси з використанням модифікованого кінетичного рівняння та рівнянь, отриманих за методом найменших квадратів. Застосування розробленої методики дає змогу на основі результатів експериментальних досліджень обчислити точні значення кінетичних констант процесів термічного розкладання деревної біомаси, а отже адекватно описати механізм розкладу досліджуваних взірців деревини, і створених на їхній основі сумішей.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КІНЕТИЧНИХ КОНСТАНТ ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ

Під час дослідження реакцій, які відбуваються у процесі спалювання деревної біомаси, застосовують і методи хімічної термодинаміки, і хімічної кінетики. Хімічна термодинаміка дає змогу обчислити тепловий ефект указаної реакції, а також передбачити, чи можливий перебіг реакції та її стан рівноваги. Для цього треба мати дані про термодинамічні параметри всіх компонентів лише у початковому та кінцевому станах системи. Але для практики треба знати й можливість здійснення цієї реакції, й швидкість її перебігу. Відповідь на це питання дає хімічна кінетика. Адже для отримання кінетичних закономірностей мають бути відомі і початковий, і кінцевий стани системи, і шлях, по якому проходить реакція, а він переважно заздалегідь невідомий. Тому отримати кінетичні закономірності складніше, ніж термодинамічні. Знаючи ці закономірності (математичну модель) досліджуваної хімічної реакції (процесу спалювання деревної біомаси) та її кінетичні параметри, можна розрахувати її швидкість й оптимальні умови перебігу в реально діючих установках.

Для математичного моделювання процесу спалювання деревини потрібно знати елементний склад цієї деревини. З врахуванням цього у роботі потрібно виконати такі експериментальні дослідження:

- 1) елементний аналіз деревини і визначення теплотехнічних характеристик деревного біопалива різних порід (зокрема швидкоростучих);
- 2) здійснення комплексного термічного аналізу деревного біопалива;
- 3) дослідження процесу спалювання деревної біомаси та визначення кінетичних констант цього процесу.

3.1 Матеріали та устаткування, що використані в експериментальних дослідженнях

3.1.1 Експериментальна установка для дослідження кінетичних констант

Для дослідження кінетичних констант процесу спалювання здрібненої деревної біомаси застосовано дериватограф – багатофункційний прилад, що дає змогу одночасно здійснювати простий і диференційний термометричний аналіз, термогравіметричний аналіз й отримувати залежність, яка відображає зміну швидкості втрати маси взірця із зміною його температури. Дослідження основних теплофізичних характеристик здрібненої деревини проводилися на експериментальній установці (дериватографі) Q-1500 D системи Paulik-Erdey, загальний вигляд якого зображений на рис. 3.1.

У процесі досліджень взірців реєстрували такі параметри:

- температуру матеріалу (Т);
- зміну маси досліджуваного взірця деревинного матеріалу (ТГ) залежно від температури;
- швидкість зміни маси (ДТГ) залежно від температури;
- тепловий ефект реакції (ДТА).

За допомогою дериватографа Q-1500 D можна здійснювати дослідження і рідких, і твердих взірців. Можуть бути досліджені взірці у виді порошку, гранул, рідини масою від 5 до 1000 мг.

У процесі безперервного програмованого нагріву взірця фіксуються зміни, котрі відбуваються у ньому:

- втрата маси (ТГ), обумовлена виділенням летких компонентів або перебігом хімічної реакції зі зміною маси взірця (приміром, розкладання з утворенням летких продуктів);
- поглинання або виділення тепла (ДТА) унаслідок фазових переходів (тверде-тверде, рідина-газ, тверде-рідина тощо), адсорбції або хімічної реакції.



Рис. 3.1. Експериментальна установка (дериватограф) Q-1500 D системи Paulik-Erdey

Цей тип дериватографа забезпечує такі апаратні можливості:

- нагрів зразка від кімнатної температури до 1000–1500°C;
- швидкість нагріву від 0.6 град / хв до 20 град / хв;
- зміна маси вимірюється з точністю до 0.1 мг, межа вимірювання маси може варіюватися від 20 до 2000 мг;
- дослідження проводяться в атмосфері повітря і в потоці інертного газу.

У ході нагріву безперервно фіксується зміна маси зразка, а також швидкість зміни маси (ТГ) і різниця температур між зразком і еталоном (ДТА).

Принципова схема дериватографа системи Paulik-Paulik-Erdey Q-1500 D показана на рисунку 3.2.

Прилад оснащений аналітичними термовагами (4), на одному коромислі яких закріплений керамічний утримувач (3) для зразків і еталона. На тримачі розміщені три термопары відградувані на заводі-виробнику. На дві термопары можна

поміщати тиглі із взірцями (1), а на третю термопару поміщають тигель з еталонною речовиною (2). Прилад може працювати в двох режимах: режим проведення простої термометрії і режим проведення диференційної термометрії. У першому випадку в роботі використовується одна проста термопара, на яку поміщений тигель із взірцем. У другому випадку використовується диференційна термопара, яка складається з двох термопар, підключених однойменними полюсами один до одного. На одній з них розміщується тигель із взірцем, на іншій – з еталонною речовиною. Вибір одного з режимів роботи відбувається за допомогою перемикача, розташованого на передній панелі приладу.

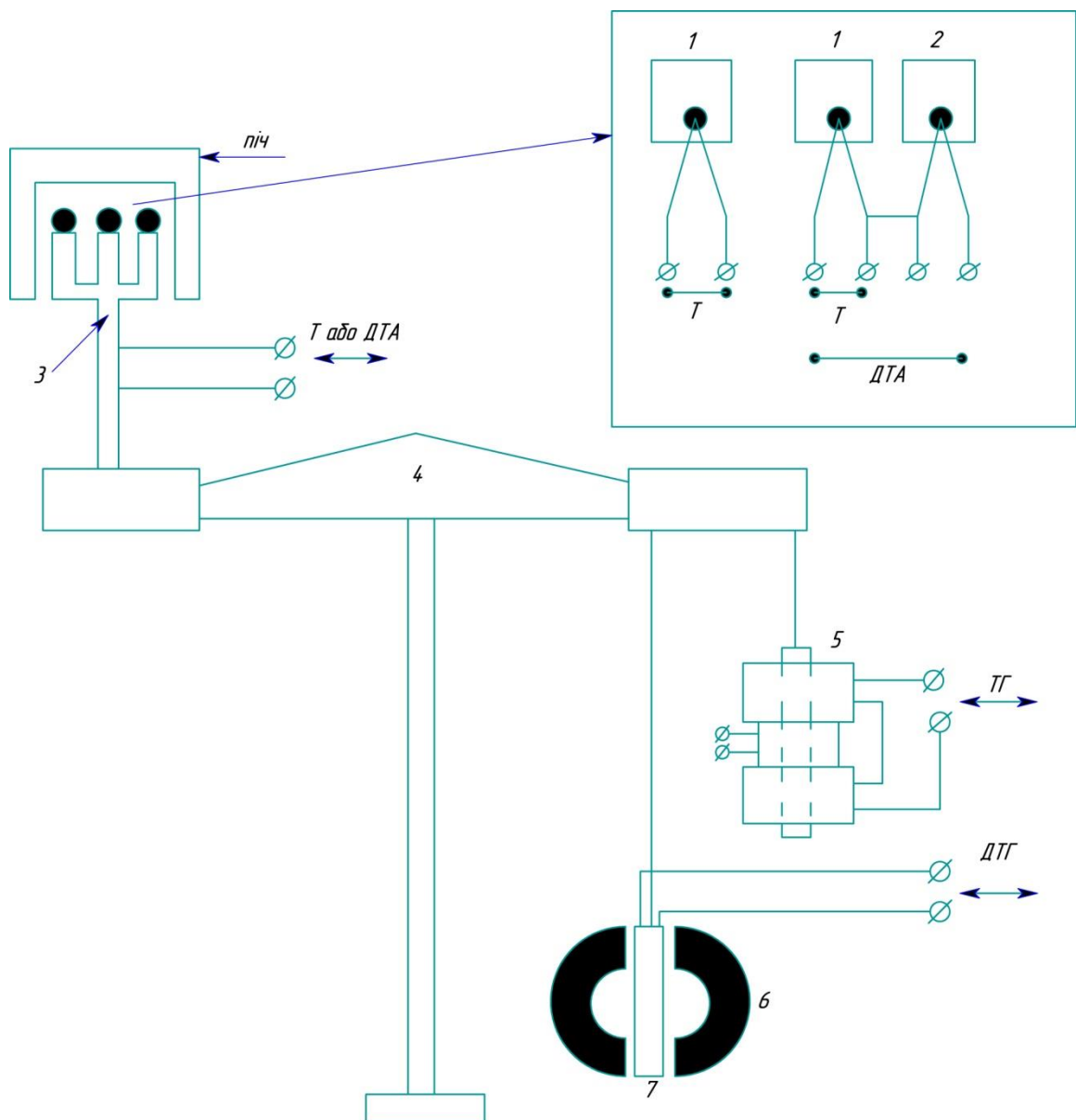


Рис. 3.2. Принципова схема дериватографа Q-1500 D системи Paulik-Paulik-Erdey

На іншому коромислі ваг розміщені два пристрої, за допомогою яких вимірюють втрату маси і швидкість втрати маси взірця. Принцип роботи цих пристроїв ґрунтується на явищі магнітної індукції.

Для вимірювання втрати маси використовують диференційний трансформатор (5), який складається з трьох котушок, розміщених вертикально на одній осі. Трансформатор закріплений нерухомо на корпусі приладу. Всередину трансформатора поміщений металевий сердечник, підвішений на коромисло ваг. Цей сердечник зміщується, коли маса досліджуваного взірця змінюється. Коли на середню котушку (первинна обмотка трансформатора) подається змінний струм, то в сусідніх котушках (вторинна обмотка трансформатора), з'єднаних один з одним зустрічно (диференційно), виникає індукційний струм. У разі симетричного розташування сердечника щодо котушок вторинної обмотки трансформатора сумарна напруга на них майже дорівнює нулю (вихідне положення ваг). У процесі зміщення сердечника сумарна напруга змінюється пропорційно величині зсуву. Отже, диференційний трансформатор перетворює рух плеча ваг у електричний сигнал, який фіксується реєструючим пристроєм. Для диференційного трансформатора характерні висока чутливість і точність вимірювання.

Крива DTG отримується за допомогою пристрою, який складається з постійного магніту (6) й індукційної котушки (7). Індукційна котушка підвішується до ваг і розміщується в полі постійного магніту. Коли маса взірця змінюється, котушка починає переміщуватись в однорідному магнітному полі. Під час руху у витках котушки виникає індукційний струм, величина якого пропорційна швидкості зміни маси.

Сигнали від термопар, диференційного трансформатора і індукційної котушки подаються через аналогово-цифровий перетворювач на комп'ютер. Таким чином, на одній термограмі отримують одночасно криві простого (T) і диференційного термічного (DTA) аналізів, криву втрати маси (TG) і криву швидкості втрати маси (DTG) (рис. 3.3).

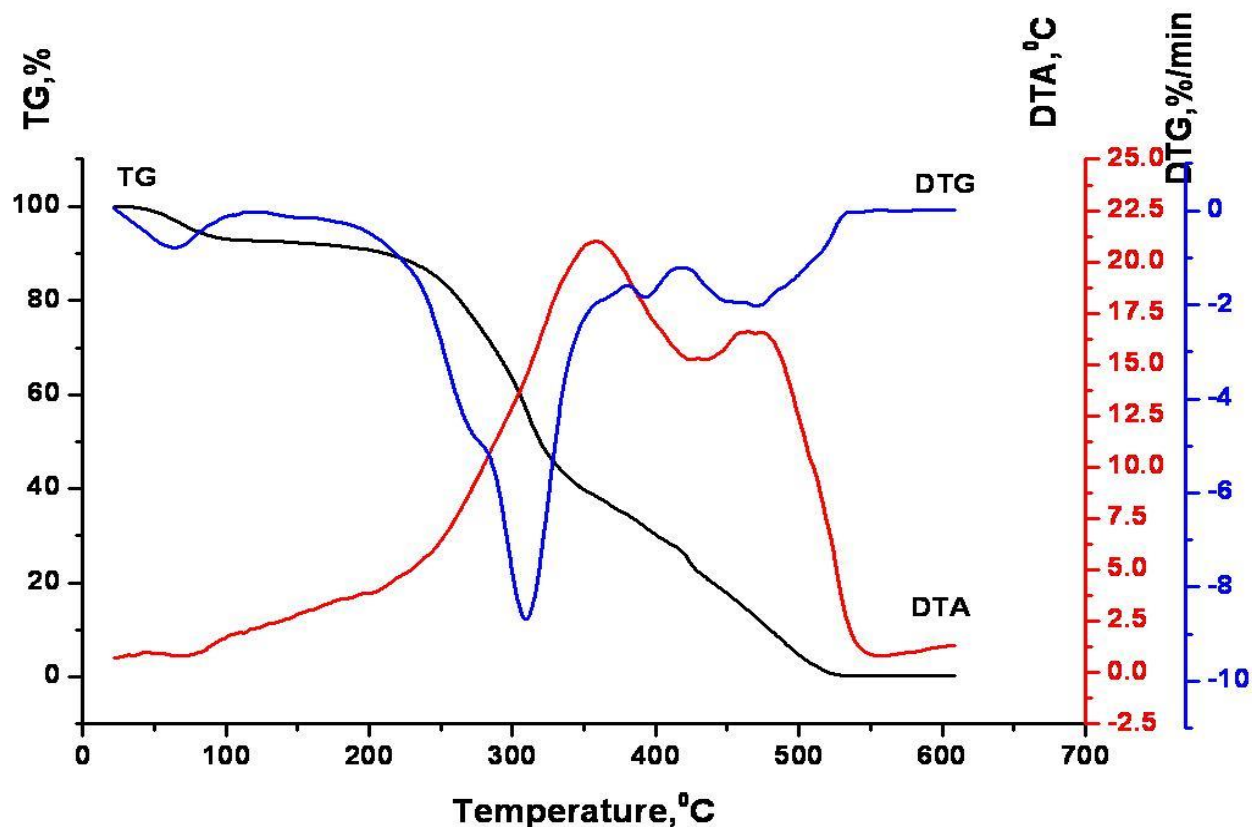


Рис. 3.3. Термограма зрізця «кора+стовбура дерева осики» віком 10 років

Дериватограф Q-1500 D дозволяє проводити термічний аналіз не лише в динамічному режимі, як було описано, а й у квазі-ізотермічному режимі. Цей режим використовують, коли потрібно дослідити розкладання речовини за постійної температури.

3.1.2 Експериментальне визначення елементного складу досліджуваних зрізців

Елементний аналіз речовини – це вид аналізу, в результаті якого визначають, з яких хімічних елементів складається речовина і який їх відсотковий вміст. Однак цим видом аналізу неможливо визначити, яким є ступінь окислення елементів і як ці елементи пов'язані між собою.

До складу зрізців деревини входять такі елементи: вуглець С, водень Н, кисень О, азот N та інші. Виявлення цих елементів виконують такими способами.

Пряме виявлення вуглецю зазвичай можна зробити за допомогою простого нагрівання, органічна речовина, що аналізується, горить майже безбарвно, з кіптявою чи світінням, або обвуглюється.

Для непрямого виявлення вуглецю у виді карбон (IV) оксиду є два способи:

- спалювання горючих сполук;
- сильне нагрівання у присутності оксиду міді (II) негорючих сполук.

Карбон діоксид, що утворюється в обох випадках, виявляють за допомогою вапняної води:



Кальцій карбонат, що водночас утворюється, дає біле помутніння або білий осад.

Водень окислюється під час спалювання або нагрівання в присутності оксиду міді (II), утворюючи воду, яка легко виявляється за допомогою смужки паперу, просоченого кобальт хлоридом. Колір змінюється з синього на рожевий.

За перебігу процесу піролізу органічної сполуки (термічному розщеплюванні без доступу повітря), утворення крапельок води свідчить про одночасну присутність зв'язаного водню і кисню.

Пряме виявлення кисню можливе також при прожарюванні сполуки з магнієм. У цьому разі утворюється білий магній оксид [32, 35, 65–66].



Рис. 3.4. Процес прямого виявлення кисню

За нагрівання сполук амінів й амінокислот, що містять азот, із сумішшю з натрій гідроксиду і кальцій оксиду утворюється амоніак, який ідентифікується

завдяки своєму запаху з допомогою вологого індикаторного паперу або димучої (концентрованої) хлоридної кислоти.

Під час нагрівання сполук, що містять сірку, з натрій гідроксидом утворюється сірководень, який виявляється за допомогою реакції з іонами свинцю (плюмбум):



Утворюється чорний, важкорозчинний свинець (II) сульфід.

Застосовуючи викладені вище основи дослідження елементного складу деревини та стандартні методики, викладені у [65, 67-68, 71, 75], автором проведено дослідження елементного складу деревини, результати якого представлено у таблиці 3.1. У наступних розділах результати елементного аналізу будуть застосовано для досліджень процесу спалювання здрібненої деревної біомаси

Таблиця 3.1

Елементний склад гнилої деревини порівняно з корою та відходами
деревообробки

№ п/п	Назва деревинних матеріалів	C, %	H, %	S, %	O, %	N, %
Деревинні відходи						
1	Стовбурова деревина	51	6,1	0	42,3	0,6
2	Стружка, опилки, тріска	50	6	0	43,4	0,6
3	Деревинно-шліфувальна пилюка	43,55	5,63	3,1...3,5	41,62	3,7
Кора						
4	Сосна	58,39	8,56	5,49	27,56	
5	Ялина	52,1	5,9			
6	Пихта	54,48	6,02	0,102	35,8	
7	Тополя	52,2	6,7	0,103	40,2	
8	Береза	70,59	9,805	5,94	13,66	
9	Дуб	49,27	1,17	10,39	33,17	
10	Бук	43,85	6,12	10,38	39,65	
11	Осика	53,92	5,78	0,03	31,1	
Гнила деревина						
12	Сосна (деструктивний тип розрізу)	51,25	5,03	0	42,82	
13	Сосна (не пошкоджена)	51,65	6,13	0	42,82	
14	Дуб (не пошкоджений)	49,24	5,47	0	45,29	
15	Дуб (корозійний)	49,24	5,59	0	45,07	

№ п/п	Назва деревинних матеріалів	C, %	H, %	S, %	O, %	N, %
16	Ялина (не пошкоджена)	44,51	6,76	0	-	
17	Ялина (корозійний тип розрізу)	41,4	6,7	0	-	
18	Ялина (деструктивний тип розрізу)	49,5	5,73	0	-	
19	Модрина (не пошкоджена)	42,86	5,85	0	52,29	
20	Модрина (деструктивний тип розрізу)	53,98	5,82	0	40,19	
Дров'яна сировина						
21	Сосна (стовбура)	49,57	6,11	0,037	34,2	1,0
22	Осика 35÷45 років (стовбура)	48,57	6,08	0,07	35,0	0,27
23	Вільха 20÷25 років (стовбура)	53,92	5,78	0,03	31,0	0,71
24	Тополя 25÷30 років (стовбура)	52,15	5,79	0,04	30,1	0,87
25	Однорічні пагони (верба Salix)	47,3	4,18	0	13,72	0,6
26	Дворічні пагони (верба Salix)	51,82	4,57	0	10,2	0,51
27	Трирічні пагони (верба Salix)	55,75	4,72	0	8,01	0,36

3.2 Методика експериментальних досліджень кінетичних констант процесу спалювання здрібненої деревної біомаси

3.2.1 Загальна характеристика методів термічного аналізу

У дослідній практиці широко застосовується група методів вивчення властивостей і складу речовин, що об'єднуються під загальною назвою «термічний аналіз». Методи основані на взаємодії речовини з тепловою енергією. У цих методах будь-який параметр досліджуваної системи вимірюють залежно від температури. Найбільше застосовують теплові ефекти, котрі є причиною або наслідком хімічних реакцій. Меншою мірою застосовують методи, основані на виділенні та поглинанні теплоти в результаті фізичних процесів [67, 69, 71, 83, 85]. Це процеси, пов'язані з переходом речовини з однієї модифікації в іншу, зі зміною агрегатного стану й іншими змінами міжмолекулярної взаємодії, скажімо,

відбуваються при розчиненні або розведенні. У табл. 3.1 наведені найпоширеніші методи термічного аналізу.

Таблиця 3.1

Методи термічного аналізу

Назва методу	Вимірюваний параметр	Вимірювальний прилад
Термогравіметрія (ТГА)	Зміна маси	Термоваги
Термогравіметрія по похідній (ДТГ)	Швидкість зміни маси	Термоваги
Термічний (ТА) та диференційно термічний аналіз (ДТА)	Теплота, яка виділяється або поглинається	Апаратура диференційного термічного аналізу
Диференційна скануюча калориметрія (ДСК)	Теплота, яка виділяється або поглинається	Диференційний скануючий калориметр
Термометричне титрування	Зміна температури	Адіабатний калориметр
Ентальпієметрія	Теплота, яка виділяється або поглинається	Адіабатний калориметр
Дилатометрія	Зміна температури	Дилатометри
Катарометрія	Зміна температури	Катарометри

Найбільшого поширення набули динамічна термогравіметрія (ТГ) і диференційний термічний аналіз (ДТА).

Зазвичай вимірювання здійснюють із заданою швидкістю підвищення температури взірця, поміщеного у спеціальну піч. У термогравіметрії (ТГ) реєструють масу взірця m , а у термогравіметрії по похідній (ДТГ) – швидкість зміни маси dm/dt залежно від температури T . Додаткову інформацію про перетворення в речовині при її нагріванні (або охолодженні) із заданою швидкістю отримують, записуючи криву ДТА, яка відобразить різницю температур T між

взірцем і інертним еталоном (зазвичай Al_2O_3). Для одержання кривої ДТА застосовують дериватограф, схема якого зображена на рис. 3.2.

Зображене з'єднання термопар двох тиглів (диференційна термопара) дає змогу чітко визначати перетворення у взірці, пов'язані зі зміною його ентальпії. Екзо- і ендоефекти відрізняються за спрямуванням піків на кривій ДТА (рис. 3.5) [67, 69, 71, 83, 85–87].

Традиційний метод ДТА дає змогу точно визначити температури і знаки переходу, але за допомогою цього способу складно отримати кількісну інформацію про взірець або теплоту того чи іншого перетворення. Подібні труднощі обумовлені тим, що залишаються невідомими такі важливі чинники, як питома теплоємність і теплопровідність взірця до і після переходу. На величину площі під ендотермою або екзотермою впливають також швидкість нагрівання, розташування термопар й інші умови експерименту.

Аби отримати кількісні результати, потрібно перетворити місце для розміщення взірців у приладі для ДТА у диференційний калориметр. Для цієї мети зазвичай використовують диференційний скануючий калориметр (ДСК) із коміркою ізотермічного типу. Метод термічного аналізу в цьому разі називають диференційною скануючою калориметрією [83, 85].

Методом термометричного титрування вивчають залежність температури аналізованої системи (зазвичай це розчин досліджуваної речовини) від об'єму титранту, який додають в адіабатичних умовах, тобто коли виділення теплоти відбувається значно швидше, ніж обмін нею із зовнішнім середовищем. Для титрування використовують автоматичні бюретки, для вимірювання температури – чутливі термопари і термістори, покази реєструють за допомогою електронних чи мікропроцесорних приладів.

Ентальпієметрія ґрунтується на визначенні кількості речовини по різницях температур, які відповідають змінам ентальпії ΔH . Надлишок концентрованого розчину реагенту одразу вводять у розчин проби, яка є в адіабатичному калориметрі. Таку методику називають прямою інжекційною ентальпієметрією (ПІЕ). Величина зміни температури ΔT пропорційна кількості виділеної теплоти:

$$\Delta T = -\frac{n \cdot \Delta H^0}{K}, \quad (3.3)$$

де K – теплоємність посудини та її вмісту, кДж/К.

Якщо теплоємність системи K відома, то по зміні температури і стандартної ентальпії ΔH^0 можна знайти кількість речовини. Метод відрізняється високою чутливістю. Скажімо, за його допомогою можна визначити $3 \cdot 10^{-9}$ моль/дм³ нітрит-йона по реакції з сульфаміною кислотою.

Метод, в основі якого є зміна лінійних і об'ємних розмірів залежно від температури, називають дилатометрією. Це термічний метод аналізу, за допомогою якого визначають переважно структурні зміни. Під час фазових переходів змінюється коефіцієнт лінійного розширення α і внаслідок цього відносне збільшення об'єму або довжини [66–69]:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T. \quad (3.4)$$

Дилатометрія застосовується головню для дослідження полімерів і дає змогу отримати інформацію про теплове розширення, ступінь їх полімеризації та кристалічності. Дилатометричним методом визначають також зміну об'єму розчинів і кінцеву точку при титруванні (дилатометричне титрування). У ході такого виду титрування простежують зміну об'єму аналізованого розчину ΔV або пропорційної йому зміни довжини Δl залежно від об'єму титранту.

Ще один метод термічного аналізу – катарометрія – ґрунтується на вимірюванні теплопровідності газових сумішей як функції їх складу. За присутності різних газоподібних речовин у потоці газу теплопровідність суміші відрізняється від теплопровідності чистого газу-носія. Якщо на шляху потоку газу помістити нагріту нитку, то ступінь її охолодження залежатиме від складу газової суміші. Катарометрія широко застосовується для аналізу технічних газових сумішей, наприклад газів, що викидаються в атмосферу промисловими підприємствами.

3.2.2 Дериватографія

Найпоширенішим методом термічного аналізу, який ґрунтується на

одночасній побудові та подальшій інтерпретації кривих ТГ, ДТГ, ДТА і Т (температури взірця), є дериватографія. Прилади, що використовуються в дериватографії, називаються дериватографами. Використовуваний дериватограф Q-1500 фірми МОМ має блок живлення; програматор, що задає швидкість зміни температури взірця; блок печей (дві циліндричні печі); блок ваг і шестиканальний самописець (використовуються 4 канали). На рис. 3.5 зображено приклад дериватограми [67–69, 75].

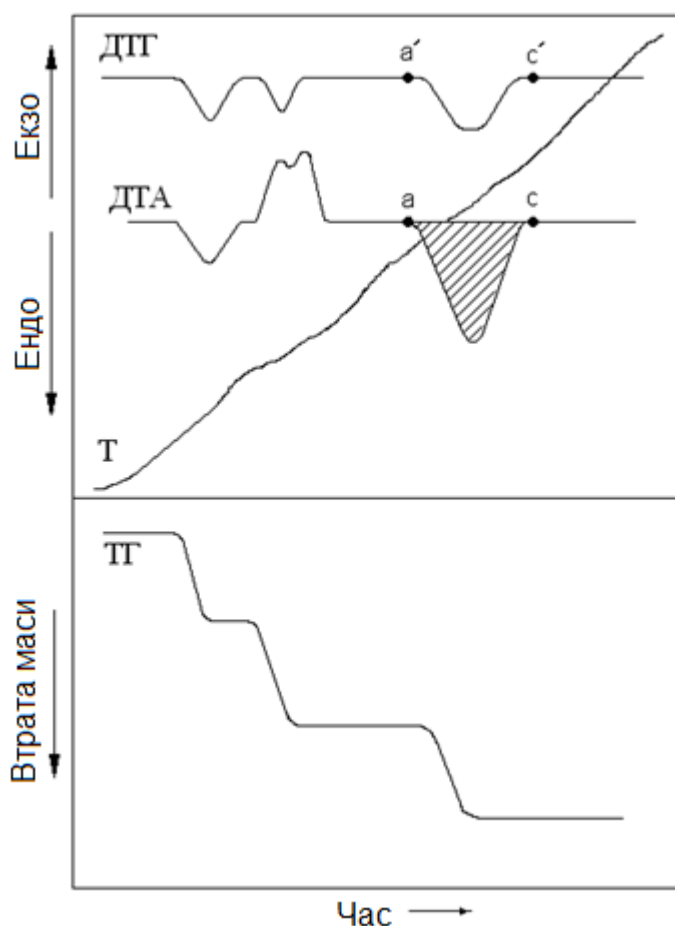


Рис. 3.5. Приклад дериватограми

Крива Т має прямолінійний характер, дещо спотворений у місцях, що відповідають значним екзо- або ендотермічним ефектам у взірці. Нанесення шкали температури на криву Т проводять за допомогою використання спеціального планшета.

Крива ДТА має відхилення від горизонталі, що відповідають екзо- (вгору) і ендоефектам (вниз) процесів, що перебігають у взірці. По цій кривій можна оцінити

кількість активної фази (яка піддається перетворенню). Оцінка ґрунтується на зміні ентальпії взірця ΔH і різниці температур ΔT між ним й інертною речовиною (Al_2O_3):

$$m = \frac{g \cdot k}{\Delta H} \int_a^c \Delta T \cdot dT, \quad (3.5)$$

де m – маса активної речовини; k – теплопровідність проби; g – постійна приладу.

Величина інтеграла відповідає площі, що обмежена лінією екстремуму на кривій ДТА і базовою лінією ac (див. рис. 3.5, заштрихована ділянка). Маючи попередньо записану в однакових умовах криву ДТА для чистого взірця відомої маси, можна по площі піків розрахувати масу активної речовини, скориставшись виразом, отриманим на основі рівняння (3.5) [67–69, 75]:

$$\Delta H = \frac{m}{g \cdot k \cdot \int_a^c \Delta T \cdot dT} = \frac{m}{g \cdot k \cdot S}, \quad (\text{кДж/моль}). \quad (3.6)$$

Оскільки для одного і того ж перетворення $\Delta H = \text{const}$, то

$$\frac{m_1}{g \cdot k \cdot S_1} = \frac{m_0}{g \cdot k \cdot S_0} \quad (3.7)$$

та

$$m_1 = m_0 \frac{S_1}{S_0}. \quad (3.8)$$

Величина S_1 / S_0 відповідає відношенню мас копій відповідних піків, вирізаних з кальки (зважують на аналітичних вагах) при відсутності аналогово-цифрового перетворювача. Відносна помилка цього методу становить 5–10%. Метод придатний для випадків, коли взірець не змінює масу в ході перетворень.

Крива ТГ відображає зміну маси взірців у ході термічних перетворень і має сходинову форму. Вона дає змогу найточніше визначити зміну маси взірця. Для її розшифрування треба знати масу активної речовини та задану верхню межу вимірювань приладу. Якщо взяти масу взірця та верхню межу приладу рівну 500 мг, то, вимірявши висоту відповідної сходинок на кривій і відносячи її до величини

верхньої межі вимірювань приладу, можна отримати частку маси взірця, яку він втратив (якщо йдеться про дегідратацію або розклад речовини) в цьому перетворенні.

Крива ДТГ дає змогу точніше зазначити точку початку та кінця перетворення, пов'язаного зі зміною маси взірця (рис. 3.5, точки a' і c'), ніж це можливо по кривій ТГ або ДТА.

Віднесення будь-якої точки на кривих ДТА, ТГ і ДТГ до відповідної температури проводять шляхом опускання вертикалей із обраних точок до перетину їх з кривою температури T [67, 69, 71, 83].

3.3 Методика опрацювання результатів експериментальних досліджень

Нині є чимало методів для визначення кінетичних параметрів, їх прийнято поділяти на диференційні, інтегральні та методи, що ґрунтуються на варіюванні швидкості нагріву.

В основі інтегральних методів є наближене інтегрування рівняння швидкості реакції. До них належать метод Райха, метод Котса-Редферна, метод Джил-Грінхау тощо [71, 83]. Загальними недоліками цих методів є необхідність одержання щонайменше двох термограм одного взірця, невизначеність порядку реакції, велика чутливість до зміни температури. Аналогічні недоліки методів, що ґрунтуються на зміні швидкості нагріву.

Знаходження кінетичних параметрів за допомогою диференційних методів базується на використанні диференційної форми рівняння кінетики деструкції. До них належать методи: вант Гоффа, Фрімена-Керрола, Дойля, Жако тощо [71, 83, 85–87, 92]. З-поміж них найпоширенішим та найуніверсальнішим є метод Фрімена-Керрола. Цей метод ґрунтується на представленні експериментальних результатів у виді залежності виду:

$$\frac{\Delta \ln\left(\frac{d\alpha}{dT}\right)}{\Delta \ln(1-\alpha)} = n - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)}{\Delta \ln(1-\alpha)}, \quad (3.9)$$

де α – ступінь перетворення, $\frac{d\alpha}{dT}$ – швидкість перетворення.

Залежність (3.9) є рівнянням прямої. За тангенсом кута нахилу цієї прямої до осі абсцис можна визначити величину $-\frac{E_a}{R}$, а відрізок, який відтинає пряма на осі ординат – n . Недоліками методу Фрімена-Керола, як і всіх інших методів, є велика кількість математичних перетворень, які вносять певну похибку й можливість оцінки лише усереднених параметрів для всього процесу (інтервалу температур). Проте спроби визначення усереднених параметрів для всього процесу не завжди є вдалі, насамперед у разі складної, асиметричної форми ДТГ-кривої.

На дериватографі записують криві ДТА, ДТГ, ТГ і Т у виді функції залежності досліджуваної величини від часу. Для їх опрацювання будують криві залежності вказаних параметрів від температури. Це здійснюється за допомогою кривої Т, яка показує зміну температури досліджуваного взірця від часу. Для нанесення на вісь абсцис температурної шкали через точки перетину горизонтальних калібрувальних ліній температури і кривої Т на вісь абсцис і наносять відповідні значення температур. На підставі отриманої температурної шкали визначають температури переходів на кривих ДТА, ДТГ, ТГ, проектуючи характерні точки перегинів на вісь абсцис. Також, проектуючи мінімуми кривої ДТГ на криву ТГ, можна визначити зміну маси, обумовлену певними переходами [67, 69, 71, 83, 92].

Втрату маси взірця (у %) знаходять на кривій ТГ, використовуючи штрихувальну сітку. Визначають температуру початку термодеструкції $T_{п}$, а також температури, відповідні втраті від маси досліджуваного взірця.

Розрахунок енергії активації E_a може бути виконаний такими методами:

1. Метод Фрімена-Керола. На крутій ділянці кривої ТГ відзначають декілька точок (рис. 3.5), визначають у кожній точці втрату маси G_i і розраховують температурні швидкості розкладу ω_{Ti} . Швидкість розкладу в кожній точці кривої ТГ дорівнює тангенсу кута нахилу дотичної до кривої в цій точці, тобто для точки 1 (рис. 3.5) [71, 83]:

$$\omega_T = \operatorname{tg}\alpha = BC/AB = \Delta G_T / \Delta T, \quad (3.10)$$

де ω_T – швидкість розкладу речовини:

$$\omega_T = -dG/dT = (z/\beta)e^{E_a/RT} G^n, \quad (3.11)$$

де G – маса взірця, що витрачається в реакції, мг; T – температура, К; z - передекспотенційний множник у рівнянні Ареніуса; β – швидкість нагріву, К/хв; R – універсальна газова стала, кДж/(моль×К) [71, 83, 85].

Якщо рівняння (3.11) застосувати для двох температур при $\beta = \text{const}$, то після логарифмування і віднімання одного з іншого отримуємо такий вираз:

$$\omega_\tau = \omega_T \beta \quad (3.12)$$

За рівнянням (3.12) розраховують $\omega_{\tau 1}$, визначають $\lg \omega_{\tau 1}$ і результати вносять у протокол експерименту.

Аналогічно розраховується $\lg \omega_{\tau 1}$ для інших точок кривої ТГ.

За одержаними даними будують логарифмічну залежність $\lg \omega_\tau = f(\lg G)$ та півлогарифмічну $\lg \omega_\tau = f(1/T)$ (див. рис. 3.6). З півлогарифмічної залежності визначають тангенс кута нахилу цієї прямої $\operatorname{tg}\alpha$ [71, 83, 85–87]:

$$\operatorname{tg}\alpha = \Delta \lg \omega_\tau / \Delta(1/T) \quad (3.13)$$

З логарифмічної залежності по тангенсу кута нахилу прямої $\operatorname{tg}\alpha'$ можна визначити порядок реакції n :

$$n = \operatorname{tg}\alpha' = \Delta \lg \omega_\tau / \Delta \lg G \quad (3.14)$$

2. Метод подвійного логарифмування. Для розрахунку E_a по кривій ТГ відзначають температуру початку деструкції і потім через інтервал 10°C втрату маси взірця ΔG_i при відповідній температурі T , знаходять $\Delta G_i / \Delta G_{i+1}$ і двічі логарифмують.

Опрацьовуючи отримані результати визначають тангенс кута нахилу $\operatorname{tg}\alpha$ і по формулі $E_a = R \operatorname{tg}\alpha$ [$R = 8,31$ кДж/(моль×К)] обчислюють E_a досліджуваних взірців [83, 85].

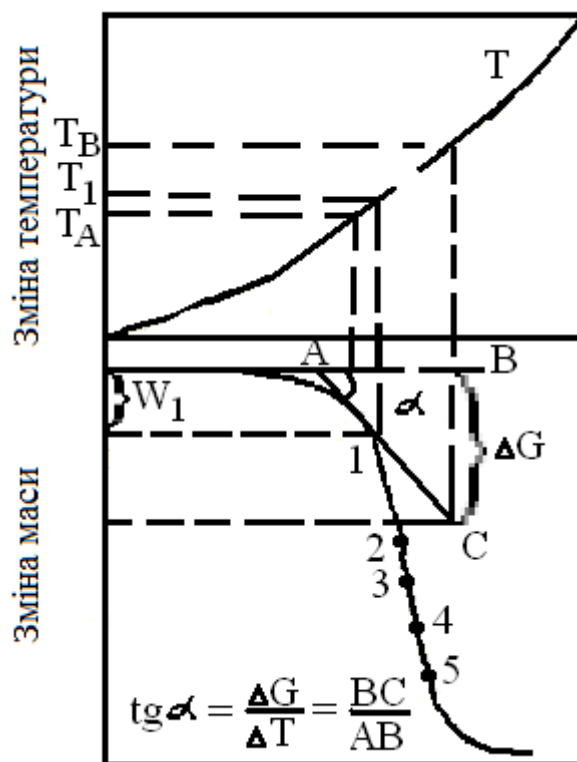


Рис. 3.6. Графічне визначення швидкості розкладу[71, 83, 85–87]

Висновки до розділу 3

Зроблено огляд і детальний аналіз методів термічного аналізу. На основі цього вибрали для виконання експериментальних досліджень метод дериватографії. Метод дериватографії є найпоширенішим методом термічного аналізу, оскільки базується на одночасній побудові й подальшій інтерпретації кривих ТГ, ДТГ, ДТА і Т. Під час виконання досліджень методом дериватографії важливе значення мають умови проведення експерименту, насамперед швидкість нагріву зрізків, що необхідно враховувати при зіставленні результатів різних досліджень.

У наступних розділах метод дериватографії буде застосовано для досліджень кінетичних параметрів процесу спалювання здрібненої деревної біомаси.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СПАЛЮВАННЯ ЗДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ

4.1 Експериментальне дослідження основних закономірностей процесу спалювання здрібненої деревної біомаси

Дослідження основних теплофізичних характеристик подрібненої деревної біомаси проводилися на експериментальній установці Q-1500 D системи Paulik-Erdey методом простого і диференційного термометричного аналізу, а також термогравіметричного аналізу, характеристики якої подані у розділі 3.

Термограми взірців, отримані за допомогою установки Q-1500 D, подані на рисунках 4.1–4.3, 4.6 – 4.7, а результати їх обробки – у таблицях 4.1, 4.2. На рис. 4.4 і 4.5 представлено порівняння кривих TG і DTA взірців деревини верби Salix.

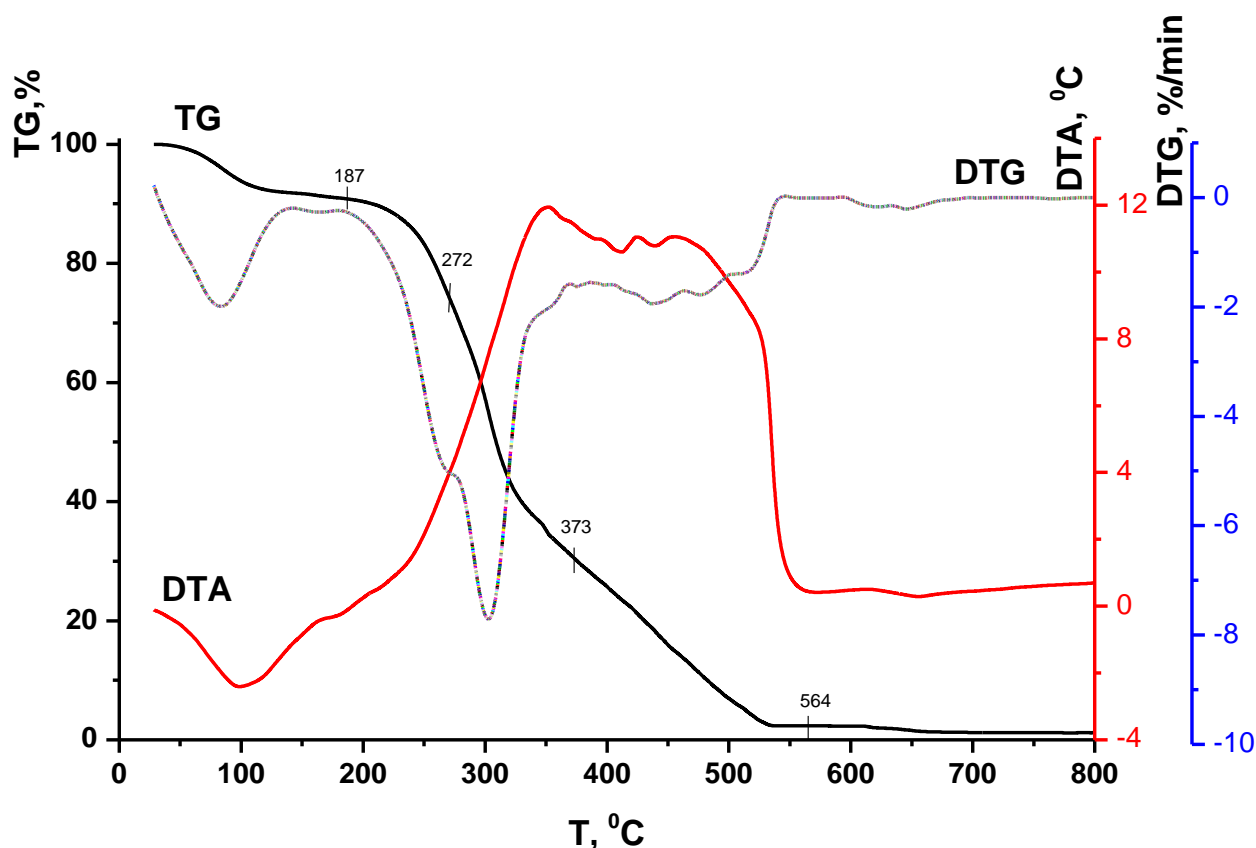


Рис. 4.1. Термограма взірця кора+стовбура деревина верби Salix (взірець 1)

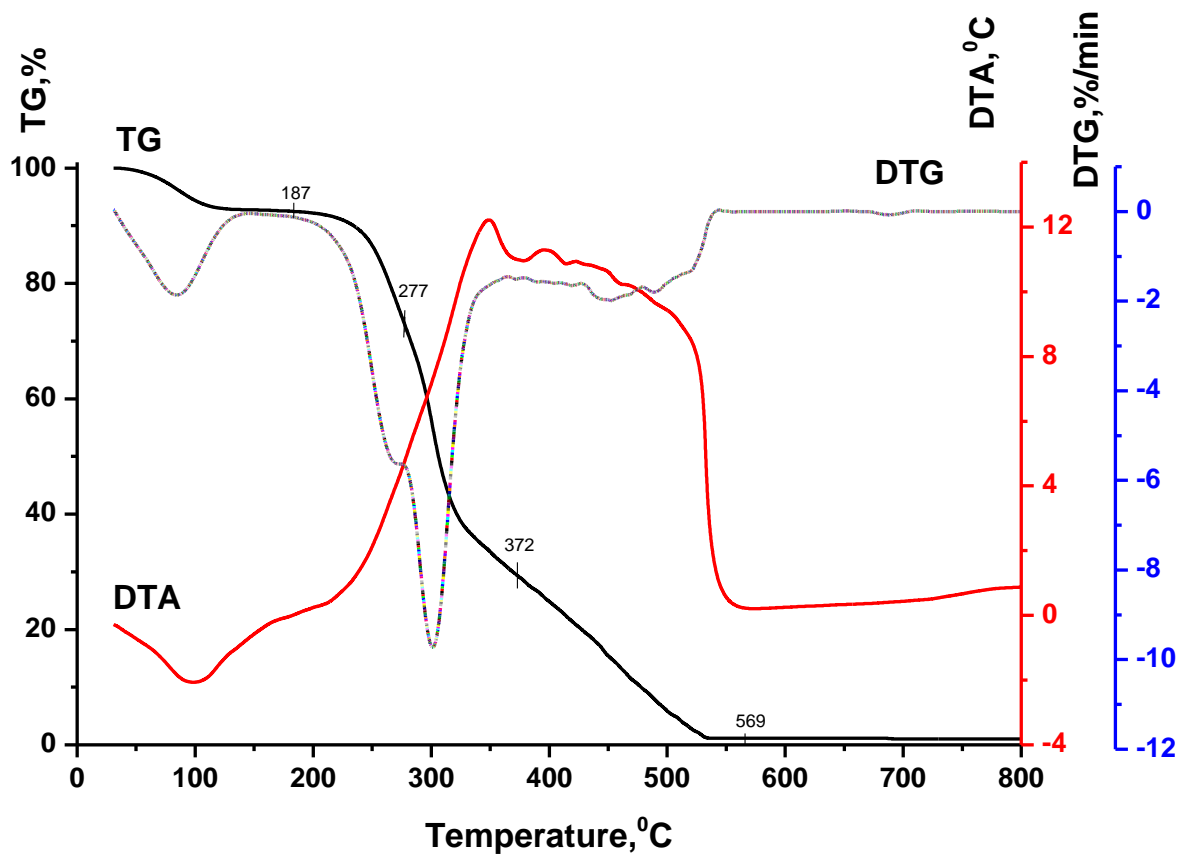


Рис. 4.2. Термограма взірця стовбурової деревини верби Salix (взірець 2)

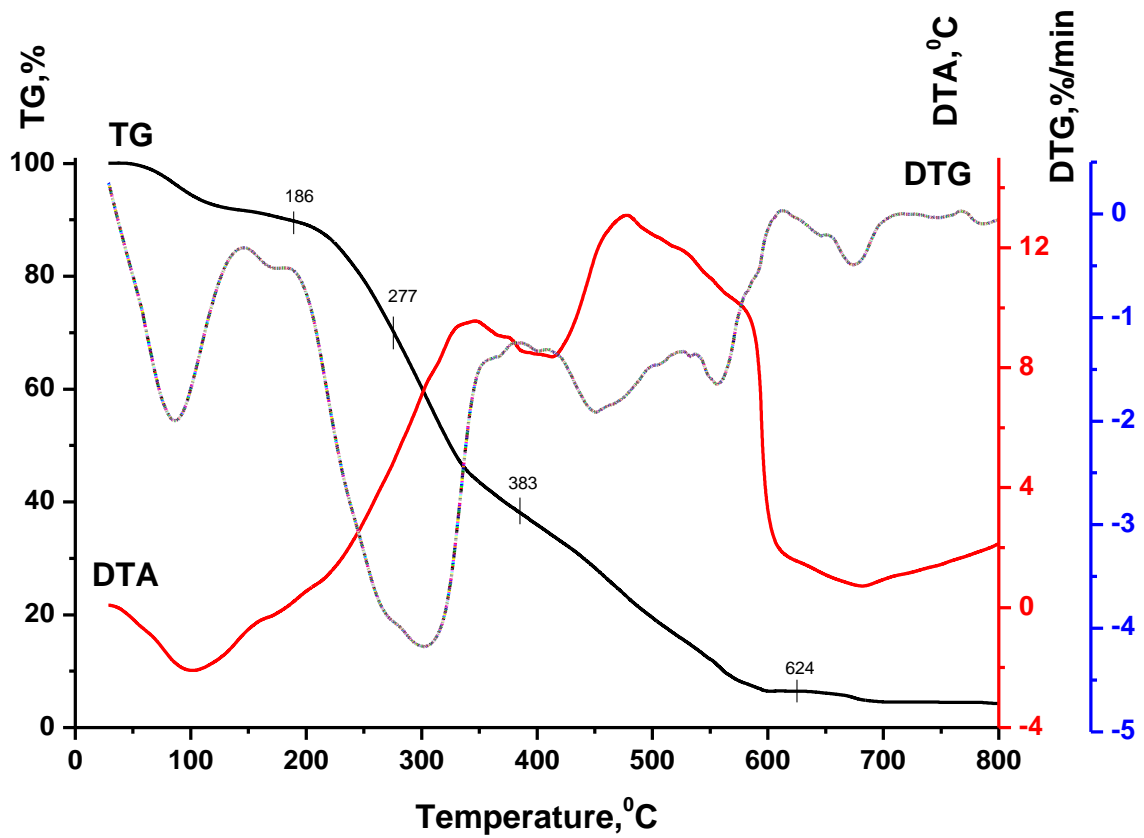


Рис. 4.3. Термограма взірця кори верби Salix (взірець 3)

Результати комплексного термогравіметричного та диференційного
термогравіметричного аналізів взірців 1–3

Зразок	Стадія	Температурний інтервал, °С	Втрата маси, %
взірець 1 (кора+стовбура деревина верби Salix)	1	20 – 187	7,6
	2	187 – 277	19,5
	3	277 – 372	43,3
	4	372 – 569	28,5
взірець 2 (стовбура деревина верби Salix)	1	20 – 187	9,2
	2	187 – 272	17,5
	3	272 – 373	42,9
	4	373 – 564	28,1
взірець 3 (кора верби Salix)	1	20 – 186	10
	2	186 – 277	20,4
	3	277 – 383	31,2
	4	383 – 624	32

На 1-й стадії (20–187 °С) відбуваються ендотермічні процеси, зумовлені випаровуванням хімічно незв'язаної води та конституційної води. Інтенсивна втрата маси взірців спостерігається на кривих TG за температур вищих 200°С.

На другій стадії термолізу, яка за даними диференційного термогравіметричного аналізу перебігає в межах температур 186–277 °С, поряд з ендотермічними процесами дегідратації та піролізу (відщеплення летких продуктів деструкції), які супроводжуються різким зниженням ступеня полімеризації целюлози, розвиваються екзотермічні термоокисні деструктивні процеси, про що свідчить хід кривої DTA взірців верби Salix (рис. 4.1–4.3).

На відміну від інших взірців верби Salix, взірець 3 на другій стадії термолізу найбільш інтенсивно втрачає масу (рис. 4.4). Це свідчить про те, що у кори найбільш інтенсивно відбуваються процеси з відщепленням летких продуктів розкладу.

На третій стадії термолізу (277–383°С), яка супроводжується найбільшою втратою маси взірців деревини верби Salix (табл. 4.1) та появою яскравого екзотермічного ефекту на кривих DTA, відбуваються активні термоокисні деструктивні процеси, які супроводжуються полуменевим горінням летких продуктів розкладу. Для взірця 3 термоокисні процеси в повітряній фазі

відбуваються найменш інтенсивно. Про це свідчить невелика втрата маси цього взірця та поява найменшого, порівняно з іншими взірцями, екзоефекту на кривій ДТА.

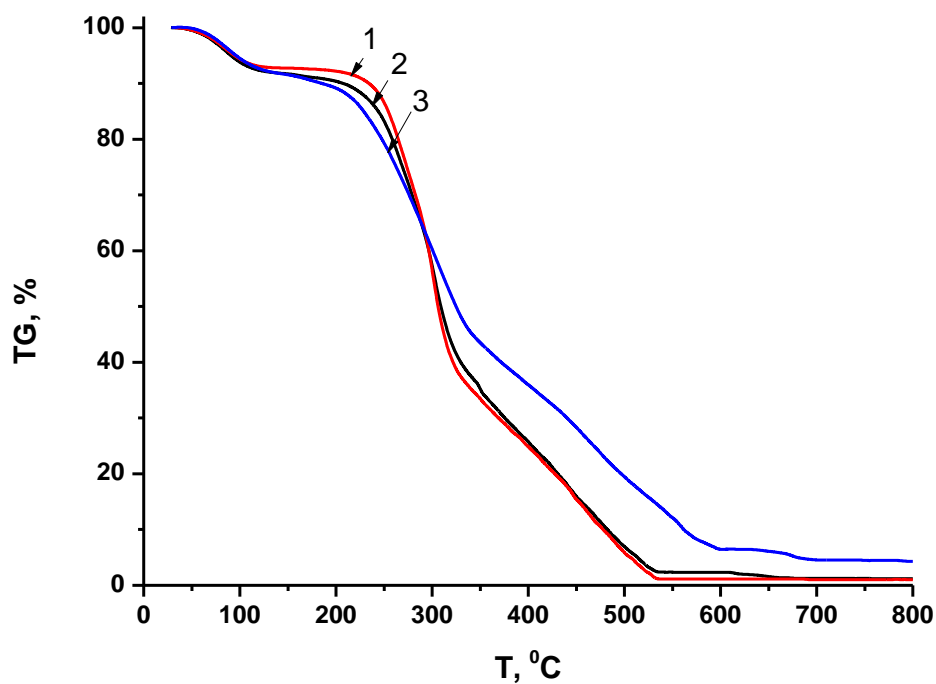


Рис. 4.4. Криві TG:
1 – взірця 1, 2 – взірця 2, 3 – взірця 3.

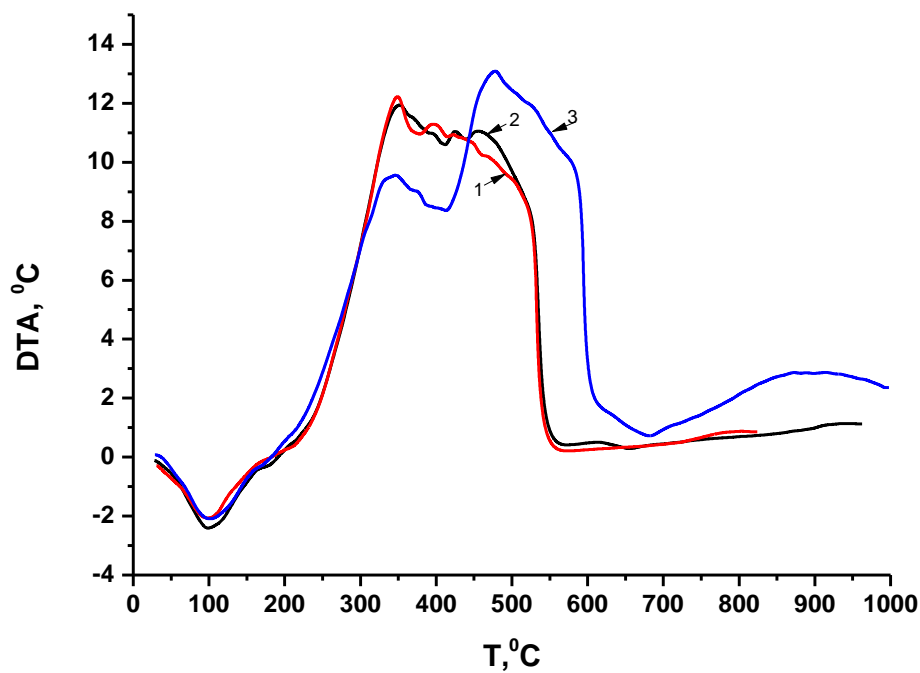


Рис. 4.5. Криві ДТА:
1 – взірця 1, 2 – взірця 2, 3 – взірця 3.

На четвертій стадії термолізу (372–624 °С) відбувається вигорання карбонізованого залишку взірців верби. Для взірця 3, який характеризується наявністю найбільшого коксового залишку, гетерогенний процес окислення відбувається найінтенсивніше. Про це свідчить виникнення найбільш яскравого, порівняно з іншими взірцями, екзотермічного ефекту на кривій ДТА, який зміщений у область вищих температур.

Як видно з проведеного термічного аналізу зразок кори має найбільшу теплотворну здатність. Процеси термоокисної деструкції та вигорання карбонізованого залишку супроводжується найбільшим екзоелементом на кривій ДТА.

Зокрема, для визначення якісно впливу віку та ступеня подрібнення верби енергетичної на процес її горіння нижче представлено результати досліджень зразків: однорічної верби *Salix Viminalis* дрібнодисперсної (зразок 1) і крупнодисперсної (зразок 2) та трьохрічної дрібнодисперсної (зразок 3) і крупнодисперсної (зразок 4). Результати термогравіметричного аналізу досліджених взірців подані в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Результати термогравіметричного аналізу взірців верби *Salix Viminalis*

Зразок	Стадія	Температурний інтервал, К	Втрата маси, %
1	I	20–170	9,87
	II	170–270	20,01
	III	270–415	39,11
	IV	415–516	30,94
2	I	20–170	8,15
	II	170–275	17,06
	III	275–420	49,27
	IV	420–530	25,52
3	I	20–170	9,87
	II	170–270	20,33
	III	270–415	40,26
	IV	415–500	29,54
4	I	20–170	8,15
	II	170–275	17,06
	III	275–420	49,27
	IV	420–550	25,52

На рис. 4.6-4.7 представлені термограми дрібнодисперсних взірців одно- та трьохрічної верби *Salix Viminalis*. На першій стадії термолізу взірців 1 і 3, яка протікає в області температур 20 – 170 °С, відбуваються ендотермічні процеси, зумовлені випаровуванням хімічно незв'язаної та конституційної води ($\Delta m = 10\%$).

На другій стадії, яка за даними диференційного термогравіметричного аналізу протікає в області температур 170 – 270 °С, поряд з ендотермічними процесами дегідратації та піролізу з відщепленням летких продуктів деструкції ($\Delta m = 20\%$), які супроводжуються різким зниженням ступеню полімеризації целюлози, розвиваються екзотермічні термоокисні деструктивні процеси, про що свідчить хід кривої DTA досліджуваних взірців верби *Salix*.

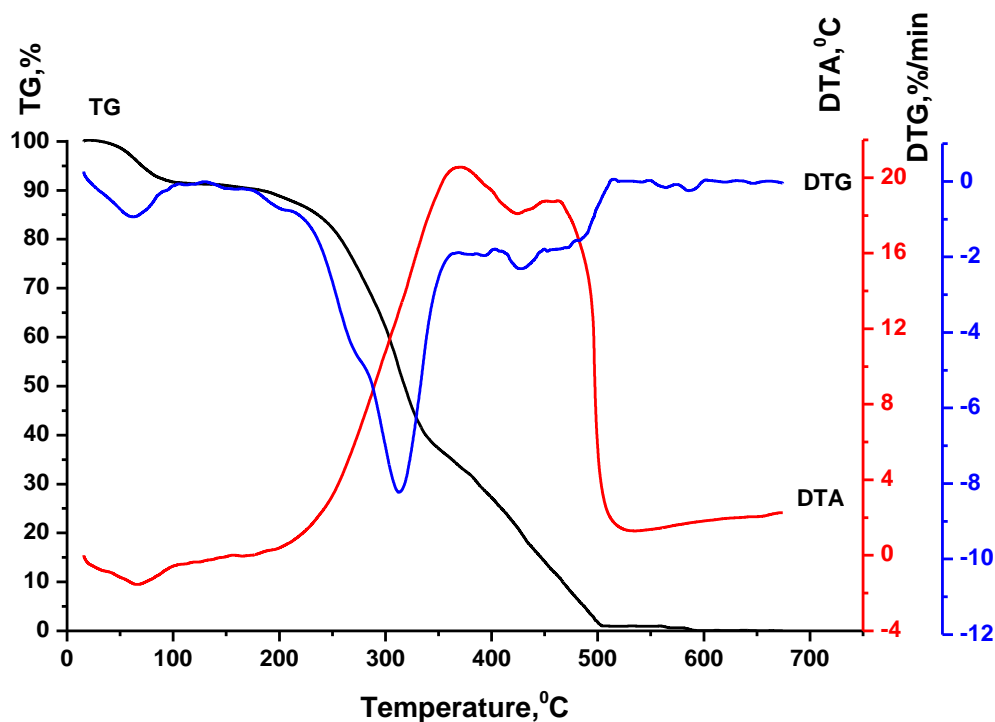


Рисунок 4.6 – Термограма взірця 1

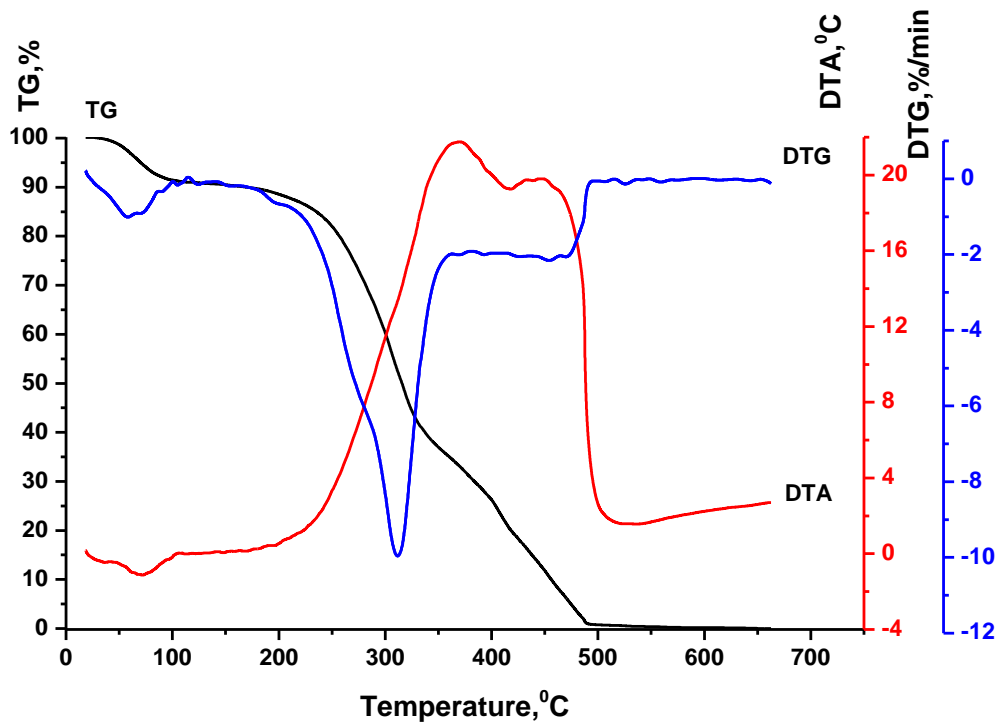


Рисунок 4.7 – Термограма взірця 3

На третій стадії термолізу ($270 - 415 \text{ }^{\circ}\text{C}$), яка супроводжується найбільшою втратою маси взірців верби *Salix Viminalis* та появою яскравого екзотермічного ефекту на кривих DTA, відбуваються активні термоокисні деструктивні процеси, які супроводжуються полумєневим горінням летких продуктів розкладу. Втрата маси взірця 1 на цій стадії складає 39%, взірця 3 – 40%.

На четвертій стадії термолізу, яка для взірця 1 протікає в області температур $415 - 516 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta m = 31\%$), а для взірця 3 - в температурному інтервалі $415 - 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta m = 30\%$), відбувається вигорання карбонізованого залишку зразків.

Процеси полумєневого горіння та згорання карбонізованого залишку у взірці 3 протікають більш інтенсивно, ніж у взірці 1. Про це свідчить більш інтенсивна втрата маси взірця трьохрічної верби *Salix Viminalis* на третій та четвертій стадіях термолізу, яка супроводжується появою більш високих екзотермічних ефектів на кривій DTA цього взірця у порівнянні із взірцем однорічної верби (рис. 4.8).

Отримані результати можна пояснити відмінностями у елементному складі взірців 1 і 3 (табл. 1). Взірець 3 відзначається більшим вмістом вуглецю $C=55,75 \%$.

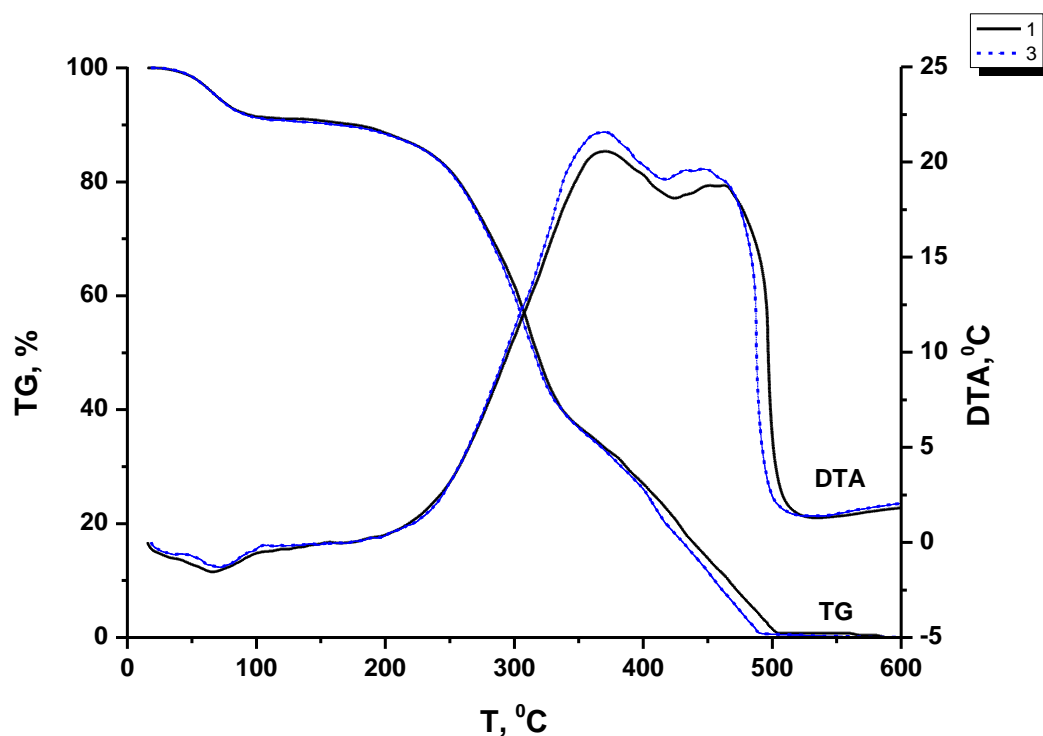


Рисунок 4.8 – Порівняння кривих ТГ і ДТА взірців 1 і 3

На рис. 4.9 і 4.10 наведено порівняння кривих ТГ і ДТА взірців одно- та трирічної верби *Salix Viminalis* різного ступеня подрібнення.

Термоліз взірців верби швидкоростучої різного віку крупніших фракцій протікає менш інтенсивно, ніж термоліз взірців *Salix Viminalis* дрібніших фракцій. Про це свідчить менш інтенсивна втрата маси взірців 2 і 4 в процесі їх нагрівання на всіх стадіях термолізу та поява менш яскравих ефектів на кривих ДТА цих взірців у порівнянні із взірцями 1 і 3 (рис. 4.9 – 4.10). Даний факт можна пояснити впливом на деструктивні, термоокисні та гетерогенно-окисні процеси площі поверхні взірців, яка зростає із збільшенням ступеню їх подрібнення.

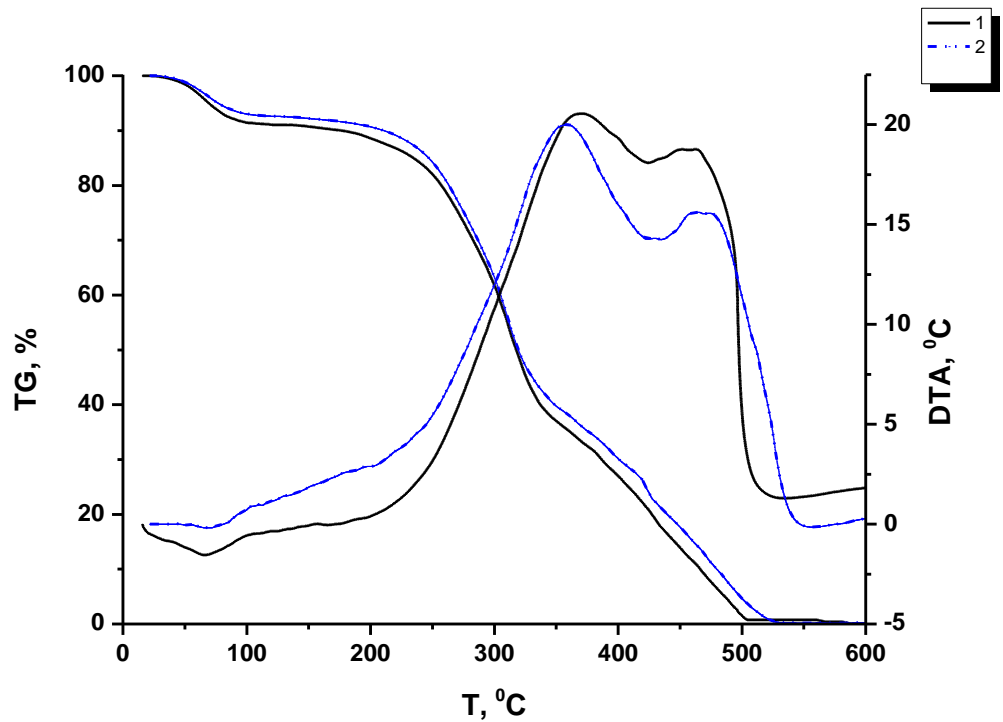


Рисунок 4.9 – Порівняння кривих TG і DTA зразків 1 і 2

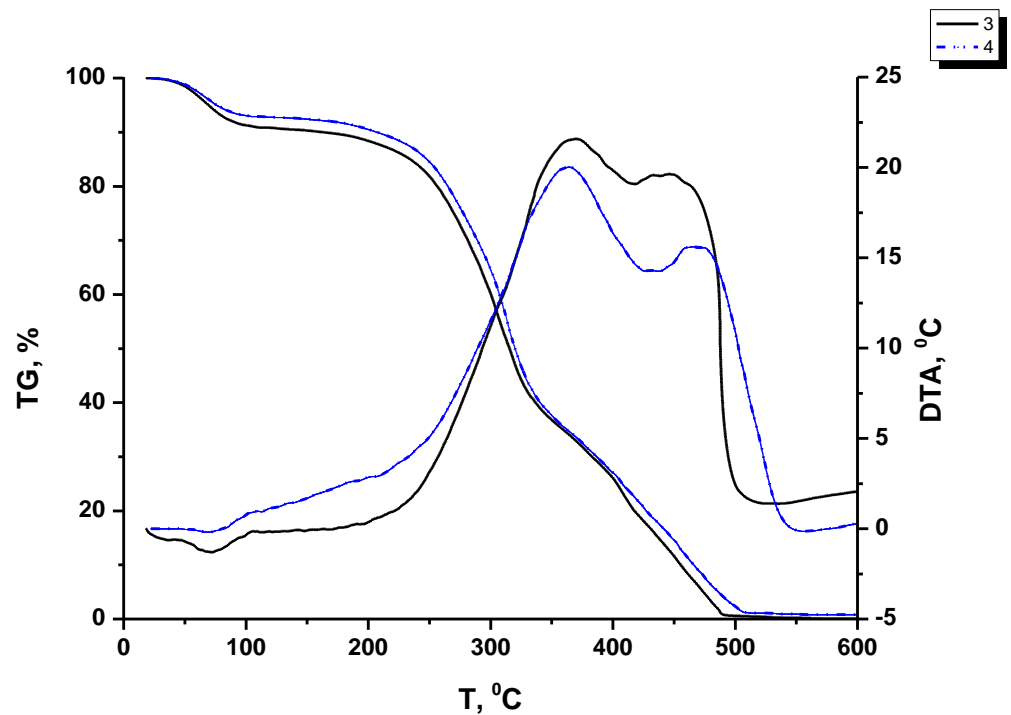


Рисунок 4.10 – Порівняння кривих TG і DTA зразків 3 і 4

За результатами виконаних експериментальних досліджень визначено якісно вплив віку та ступеня подрібнення верби енергетичної на процес її горіння та сформовано базу для визначення кінетичних констант процесу спалювання різних

сортів здрібненої деревини.

У цьому підрозділі представлено результати досліджень процесу самозаймання деревини верби *Salix*. Автором також виконано дослідження процесу самозагоряння інших порід деревини, зокрема: тополі, вільхи, осики. Результати досліджень цих порід представлено у додатку 4.

4.2 Аналіз результатів експериментальних досліджень процесу спалювання здрібненої деревної біомаси

4.2.1 Визначення кінетичних констант процесу спалювання верби *Salix*

Для визначення кінетичних параметрів процесу спалювання використовуємо криву втрати маси та кінетичне рівняння виду (2.24):

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = K * (1 - \alpha)^n = k_0 * \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) * (1 - \alpha)^n, \quad (4.1)$$

де крім позначень, застосованих у (2.24), τ – час, с;

W – втрата маси взірця при даній температурі, мг;

$K = k_0 * \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$ – константа швидкості реакції, s^{-1} ;

Якщо не розглядати зміну температури в часі, як у (2.26) та прологарифмувати (4.1), отримуємо:

$$\ln\left[\frac{d\alpha}{d\tau}\right] = \ln k_0 - \frac{E}{RT} + n * \ln(1 - \alpha) \quad (4.2)$$

Цей вираз можна подати у виді:

$$\Omega = ax + by + c \quad (4.3)$$

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

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

Необхідно знайти невідомі k_0 , E , n .

Величину $\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{dW}{d\tau} * \frac{1}{W_k}$ можна визначити аналітично, використовуючи інтерполяцію кривої втрати маси поліномом другого порядку. З кривої втрати маси для зразка верби *Salix* отримуємо залежність втрати маси від часу, представлену у таблиці 4.3.

Втрата маси залежно від часу (для зрізця трирічної верби)

$\tau \cdot 10^{-2}$ 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 $y = ax^2 + bx + c$ буде мати вид:

$$\begin{cases} (\sum x^4) * a + (\sum x^3) * b + (\sum x^2) * c = \sum(x^2 * y) \\ (\sum x^3) * a + (\sum x^2) * b + (\sum x) * c = \sum(x * y) \\ (\sum x^2) * a + (\sum x) * b + m * c = \sum y \end{cases} \quad (4.4)$$

де m – кількість точок у наборі експериментальних значень залежності ($m=8$).

Розв'язуючи систему рівнянь (4.4) для набору експериментальних значень залежності втрати маси від часу (див. табл.4.2) отримуємо:

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

Отже аналітична залежність втрати маси від часу матиме такий вигляд:

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

Відповідно швидкість втрати маси для досліджуваного зразка верби *Salix* має вигляд:

$$\frac{dW}{d\tau} = 0,04324 * \tau + 3,4657. \quad (4.6)$$

Однак для випадку, коли потрібно отримати значення кінетичних констант на основі отриманої залежності втрати маси від температури, доцільно застосувати кінетичне рівняння у формі (2.28) і, відповідно, систему рівнянь (2.31) для обчислення кінетичних констант.

Приклад застосування системи рівнянь (2.31) на основі кривої втрати маси в залежності від температури для зразка верби *Salix*, подано у таблиці 4.4.

Приклад формування вхідних даних для розв'язування системи рівнянь (2.31)

T	$\frac{1}{T} * 10^3$	$\frac{1}{T^2} * 10^6$	z	$\ln\left(1 - \frac{W}{W_k}\right)$	$\left(\ln\left(1 - \frac{W}{W_k}\right)\right)^2$	$\frac{1}{T} * \ln\left(1 - \frac{W}{W_k}\right)$
385,5	2,594	6,729	-1,4809	$-1,935 * 10^{-2}$	$3,746 * 10^{-4}$	$-5,019 * 10^{-5}$
394,3	2,536	6,432	-1,475	$-9,294 * 10^{-2}$	$8,639 * 10^{-3}$	$-23,56 * 10^{-5}$
405,5	2,466	6,081	-1,469	$-2,194 * 10^{-1}$	$4,817 * 10^{-2}$	$-5,41 * 10^{-4}$
415,5	2,4067	5,792	-1,463	$-3,643 * 10^{-1}$	$1,327 * 10^{-1}$	$-8,767 * 10^{-4}$
428	2,336	5,4589	-1,457	$-5,331 * 10^{-1}$	$2,850 * 10^{-1}$	$-12,469 * 10^{-4}$
435,5	2,296	5,2725	-1,451	$-7,380 * 10^{-1}$	$5,447 * 10^{-1}$	$-16,944 * 10^{-4}$
448	2,232	4,982	-1,446	$-9,949 * 10^{-1}$	$9,900 * 10^{-1}$	$-22,206 * 10^{-4}$
460,5	2,171	4,7156	-1,440	$-13,416 * 10^{-1}$	$17,999 * 10^{-1}$	$-29,126 * 10^{-4}$
Σ	$19,036 * 10^3$	$45,46 * 10^6$	-11,681	$-41,913 * 10^{-1}$	$37,523 * 10^{-1}$	$-94,92 * 10^{-4}$

Підставивши дані з таблиці 4.4 у систему рівнянь (2.31), отримаємо:

$$\begin{cases} 45,46 * 10^{-6} * a - 94,92 * 10^{-4} * b + 19,036 * 10^{-3} * c = -27,814 * 10^{-3} \\ -94,92 * 10^{-4} * a + 3,7523 * b - 4,1913 * c = 6,2401 \\ 19,036 * 10^{-3} * a - 4,1913 * b + 8 * c = -11,681 \end{cases} \quad (4.7)$$

Розв'язуючи систему (4.7), отримуємо значення:

$E = -a * R$, (кДж/моль) – енергії активації;

$c = \ln B$ – передекспоненційного множника (c^{-1});

n – порядку реакції.

У табл. 4.5 і 4.6 наведено результати дослідження процесу спалювання зразків верби *Salix* за допомогою застосування інтегрального та диференційного методів [86–88]. Із табл. 4.5 видно, що в інтервалі ступенів перетворення $\alpha = 0,02 \div 0,24$ лімітуючою стадією спалювання є процес зародкоутворення та росту зародків, що описується функціями $g_1(\alpha) \div g_6(\alpha)$. За результатами диференційного методу (табл. 4.6) процес нуклеалізації найбільш ймовірно описується функцією $f_6(\alpha)$

(коефіцієнт кореляції 0,99998).

Таблиця 4.5

Результати інтегрального методу дослідження механізму хімічної реакції для процесу спалювання деревини

№	Вигляд функції $g(\alpha)$	Коефіцієнт кореляції залежності $g(\alpha)=f(1/T)$				
		$\alpha = 0,02 \div 0,24$	$\alpha = 0,24 \div 0,38$	$\alpha = 0,38 \div 0,55$	$\alpha = 0,55 \div 0,70$	$\alpha = 0,70 \div 0,88$
1	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/4}$	0,99906	0,99998	0,99994	0,99993	-
2	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$	0,99906	0,99998	0,99994	0,99993	-
3	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$	0,99906	0,99998	0,99994	0,99993	-
4	$[-\ln(1-\alpha)]^{2/3}$	0,99906	0,99998	0,99994	0,99993	-
5	$[-\ln(1-\alpha)]^{3/4}$	0,99906	0,99998	0,99994	0,99993	-
6	$[-\ln(1-\alpha)]$	0,99906	0,99998	0,99994	0,99993	-
7	$[1-(1-\alpha)^{1/2}]$	0,99872	0,99990	0,99976	0,99968	0,99856
8	$[1-(1-\alpha)^{1/2}]$	0,99884	0,99993	0,99984	0,99979	0,99910
9	$(1-\alpha)\ln(1-\alpha) + \alpha$	0,99869	0,99987	0,99968	0,99960	0,99790
10	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$	0,99893	0,99994	0,99986	0,99982	0,99921
11	$(1+\alpha)^{1/3} - 1$	0,99799	0,99967	0,99929	0,99920	-
12	$1 - 2\alpha/3 - (1-\alpha)^{2/3}$	0,99878	0,99990	0,99975	0,99969	0,99847

За даними диференційного методу можна виокремити функції $f_6(\alpha)$ і $f_{10}(\alpha)$ (табл. 4.6), яким відповідають найбільші значення коефіцієнтів кореляції залежності

$$\ln \frac{d\alpha/dT}{f(\alpha)} = f\left(\frac{1}{T}\right).$$

Таблиця 4.6

Результати диференційного методу дослідження механізму хімічної реакції для процесу спалювання деревини

№	Вигляд функції $f(\alpha)$	Коефіцієнт кореляції залежності $f(\alpha)=f(1/T)$				
		$\alpha = 0,02 \div 0,24$	$\alpha = 0,24 \div 0,38$	$\alpha = 0,38 \div 0,55$	$\alpha = 0,55 \div 0,70$	$\alpha = 0,70 \div 0,88$
1	$(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{3/4}$	0,40350	0,97347	0,95083	0,99648	-
2	$(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{2/3}$	0,95287	0,99704	0,94927	0,97257	-
3	$(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$	0,99585	0,99935	0,99715	0,99249	-
4	$(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/3}$	0,99922	0,99968	0,99891	0,99836	-
5	$(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/4}$	0,99965	0,99975	0,99919	0,99890	-
6	$(1-\alpha)$	0,99998	0,99985	0,99956	0,99921	-
7	$(1-\alpha)^{1/2}$	0,99983	0,99898	0,99498	0,96221	0,96474
8	$(1-\alpha)^{2/3}$	0,99983	0,99941	0,99775	0,99391	0,21490
9	$[- \ln(1-\alpha)]^{-1}$	0,99925	0,99950	0,99817	0,99547	0,16306
10	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^{-1}(1-\alpha)^{2/3}$	0,99954	0,99980	0,99943	0,99925	0,99494
11	$[(1+\alpha)^{1/3} - 1]^{-1}(1+\alpha)^{2/3}$	0,99885	0,99369	0,25486	0,99164	-
12	$[(1/(1+\alpha))^{1/3} - 1]^{-1}$	0,99936	0,99963	0,99876	0,99764	0,94097

В інтервалі ступенів перетворення 0,55÷0,70 механізм реакції змінюється. Подальший хід процесу визначається дифузією, яка описується функцією $f_{10}(\alpha)$ (табл. 4.6). Лімітуючою стадією є процес дифузії, який описується функцією $f_{10}(\alpha)$ (табл. 4.6) (коефіцієнт кореляції 0,99494).

В області ступенів перетворення взірця верби $\alpha \leq 0,55$ з використанням методу найменших квадратів були визначені кінетичні параметри процесу спалювання взірця верби Salix (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Результати розрахунку кінетичних параметрів процесу спалювання деревини
верби Salix

Інтервал, α %	Механізм	Вигляд функції $f(\alpha)$	Е, кДж/моль	k_0
0,02 – 0,24	Нуклеалізація	$(1 - \alpha)$	48	$0,17 \cdot 10^3$
0,24 – 0,38	Нуклеалізація	$(1 - \alpha)$	41	$0,12 \cdot 10^3$
	Дифузія	$[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^{-1} (1 - \alpha)^{2/3}$	62	$0,047 \cdot 10^4$
0,38 – 0,55	Нуклеалізація	$(1 - \alpha)$	33	$0,02 \cdot 10^3$
	Дифузія	$[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^{-1} (1 - \alpha)^{2/3}$	55	$0,039 \cdot 10^4$

Процеси нуклеалізації взірця верби Salix характеризуються невисокими значеннями енергій активації. Зменшення ж енергії активації процесів нуклеалізації та дифузії із зростанням ступеню перетворення взірця деревини верби Salix можна пояснити збільшенням швидкості реакції на початкових етапах її перебігу.

4.2.2 Визначення параметрів процесу самозагоряння верби Salix

Першим етапом є дослідження процесу самозагоряння без урахування тепловідведення (вплив режимних умов: концентрації реагентів, швидкості):

$$\frac{1}{\theta^2} * e^{-\frac{1}{\theta}} - \frac{d\theta}{d\chi} = 0, \quad (4.9)$$

де $\theta = \frac{RT}{E}$ – безрозмірна температура;

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

Для отримання рівняння виду $\Theta = \Theta(\chi, \Theta_1)$ рівняння (4.9) перетворимо до вигляду:

$$\frac{1}{\theta^2} * e^{-\frac{1}{\theta}} = \frac{d\theta}{d\chi} \quad (4.10)$$

$$d\chi = \frac{d\theta}{\frac{1}{\theta^2 * e^{\frac{1}{\theta}}}} \quad (4.11)$$

$$\int_0^\chi d\chi = \int_{\theta_1}^\theta \theta^2 * e^{\frac{1}{\theta}} d\theta \quad (4.12)$$

Рівняння (4.9) є універсальним, його можна використовувати для палива будь-якого виду.

Проінтегрувавши залежність (4.12) за початкової температури суміші частинок деревини і повітря $t_1 = 5, 10, \dots, 50$ °С, отримаємо результати, зображені у виді графіків на рис. 4.11.

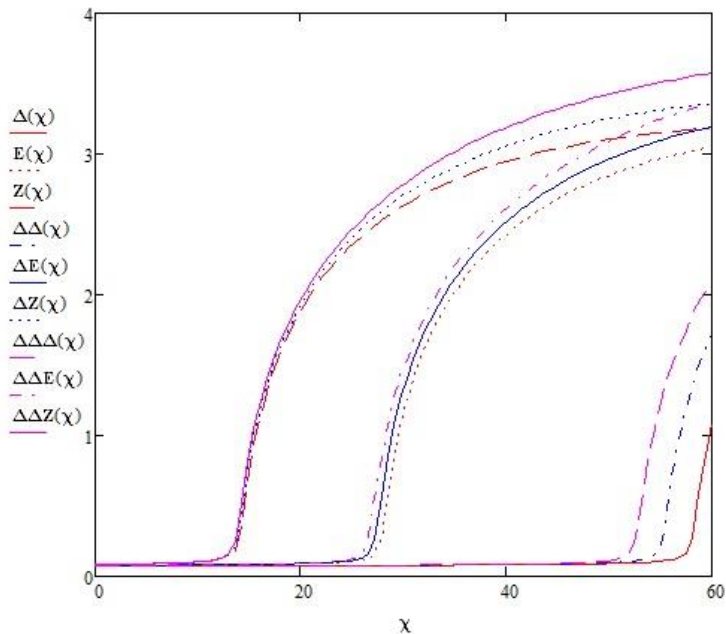
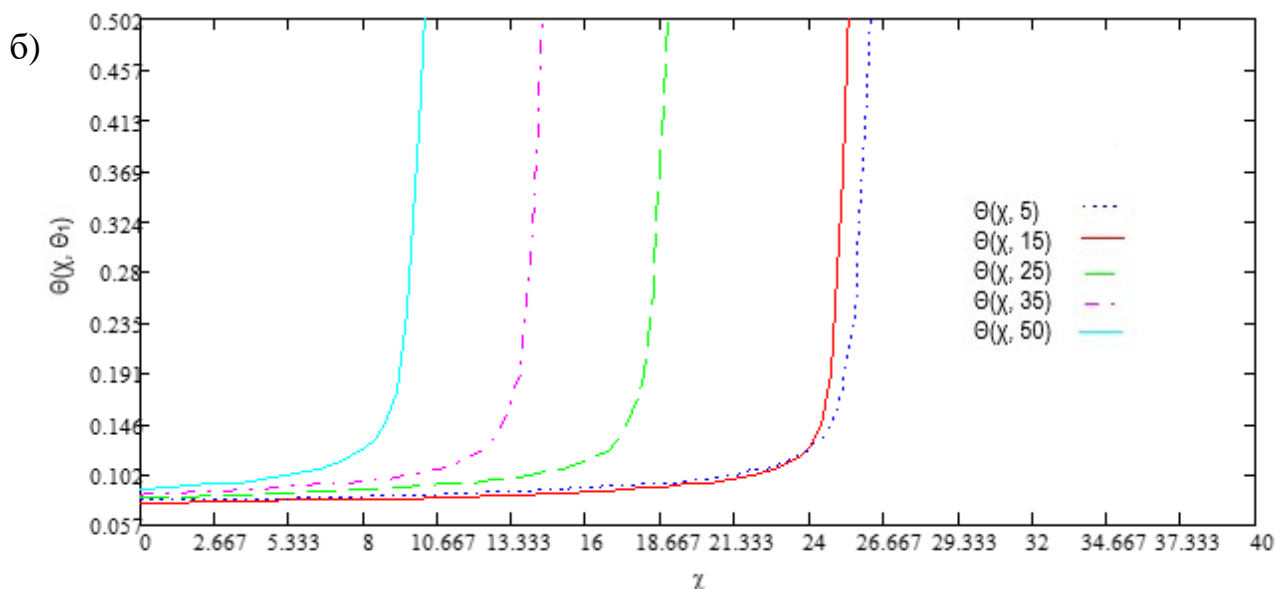
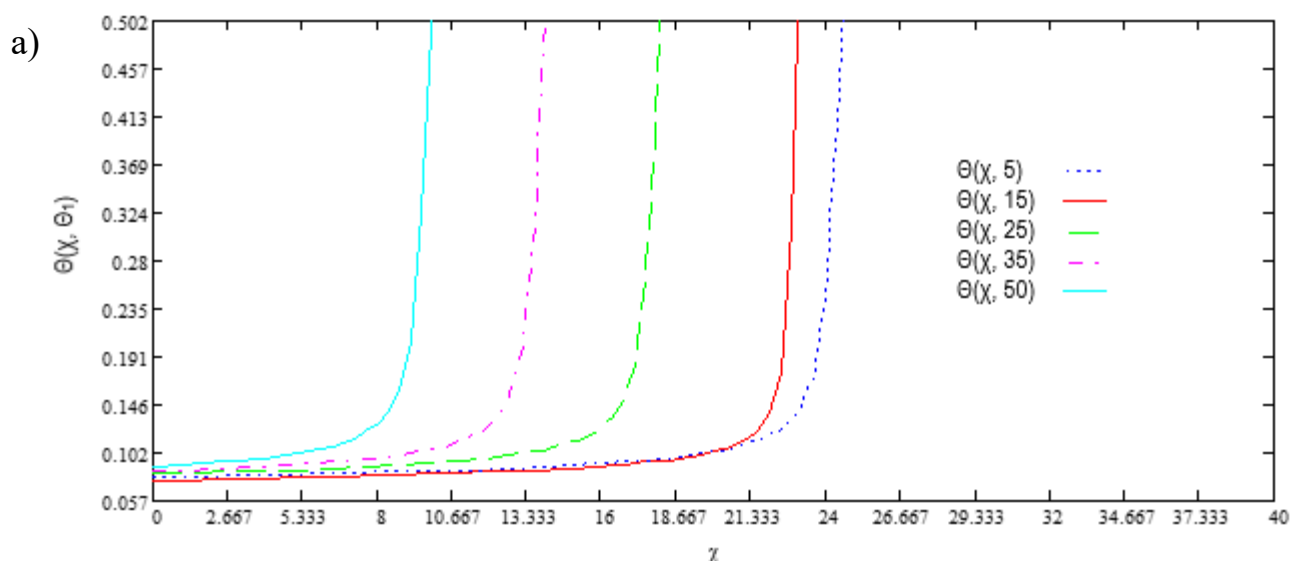


Рис. 4.11. Зростання безрозмірної температури реакуючої суміші з урахуванням температури навколишнього середовища (5, 25, 50 °С) та зольності верби Salix ($A^p = 0.84 \div 1.18\%$) по безрозмірній довжині камери згорання χ

Для окремого зразка здрібненої деревної біомаси з відомим елементним складом коефіцієнт тепловіддачі Ω залежить від коефіцієнта надлишку повітря $\alpha_{\text{п}}$ (який впливає на значення концентрації кисню), а також від розміру деревинних частинок (впливає на значення площі поверхні реагування деревинних частинок). Тому у роботі досліджено залежності $\Theta(\chi, \Theta_1)$ за умов зміни двох названих параметрів. Зокрема, приймаючи, що $\alpha_{\text{п}}$ змінюється в межах: $\alpha_{\text{п}} = 1,0 \dots 4,0$ отримали відповідні залежності $\Theta = \Theta(\chi, \Theta_1)$, що представлені на рис.4.12.



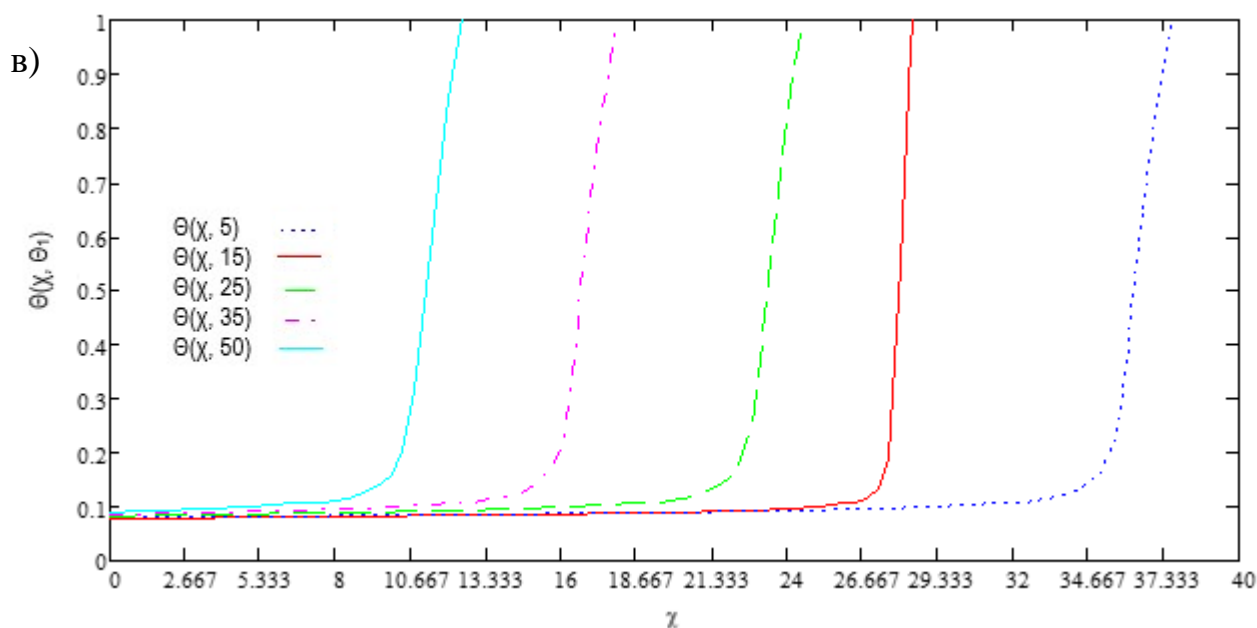


Рис. 4.12. Залежність безрозмірної температури трирічної верби Salix від безрозмірної координати χ за коефіцієнта надлишку повітря:
а) $\alpha_n = 1,09$; б) $\alpha_n = 1,3$; в) $\alpha_n = 1.91$

З рис. 4.12 видно, що довжина ділянки загоряння паливо-повітряної суміші значно залежить від початкової температури суміші (температури стінок камери згоряння), а також від коефіцієнта надлишку повітря. Зокрема, значення безрозмірної довжини ділянки самозагоряння χ , отримані для різних значень коефіцієнта надлишку повітря α_n для одного із значень безрозмірної початкової температури суміші представлено у табл.4.8. З таблиці 4.8 а також з рис.4.12 видно, що реалізація процесу горіння з коефіцієнтом надлишку повітря α_n більшим від 1,3 призводить до суттєвого зростання коефіцієнта тепловіддачі Ω , довжини ділянки самозагоряння суміші χ , а для $\alpha_n > 2,0$ та для низьких початкових значень температури Θ_1 суміші самозаймання може не відбутися ($\chi=\infty$). За результатами експериментальних досліджень процесів спалювання здрібненої деревної біомаси, а саме за результатами аналізу складу димових газів підтверджено, що для формування ефективного процесу горіння, а, отже, й отримання високого коефіцієнта корисної дії котлоагрегату потрібно забезпечити значення коефіцієнта α_n у діапазоні від 1,1 до 1,35.

Таблиця 4.8

Залежність параметрів процесу самозагоряння від коефіцієнта надлишку повітря

Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_{\text{п}}$	1	1.01	1.09	1.3	2	4
Безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі Ω	0.02335	0.02382	0.02774	0.03947	0.05519	0.35364
Довжина ділянки самозагоряння χ для $\Theta_1 = 0.0878$ (50 °C)	8.06	8.07	8.49	9.12	10.33	∞

Знайдемо функціональну залежності між початковою температурою і відповідною ділянкою запалювання. Залежність $\theta_1 = f(\chi_{\text{в}}^0)$ буде універсальною для різноманітних палив (деревних сумішей) і режимних параметрів і має такий вигляд:

$$\theta_1 = 0.073 + 0.02878 * e^{-\frac{\chi_{\text{в}}^0}{11.21521}}, \quad (4.13)$$

де $\chi_{\text{в}}^0$ – безрозмірна величина ділянки самозагоряння за відсутності тепловідведення;

Θ_1 – початкова безрозмірна температура.

Значення величини безрозмірної ділянки самозагоряння визначимо з (4.13):

$$\chi_{\text{в}}^0 = 11.21521 * \ln \frac{0.02878}{\theta_1 - 0.073} \quad (4.14)$$

або

$$\chi_{\text{в}}^0 = 791.70311 - 17558.94956\theta_1 + 98308.35565\theta_1^2 \quad (4.15)$$

Температура запалювання залежатиме і від режимних умов, і від розвитку процесу.

Перебіг процесу самозагоряння із урахуванням тепловідведення описується залежністю виду:

$$\frac{1}{\theta^2} * e^{-\frac{1}{\theta}} - \frac{d\theta}{d\chi} - \Omega(\Theta - \Theta_1) = 0, \quad (4.16)$$

де Ω – безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі.

$$\Omega = \frac{4\alpha_c * E^3}{273^2 * \beta * k_0 * C_0 * \mu_0 * f * Q * R^3 * d}, \quad (4.17)$$

де α_c – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²*К; d – діаметр камери згорання, м.

Початкові умови: $\Theta_1=0.0455\dots 0.1$.

З рівняння (4.17) Ω буде залежати лише від коефіцієнта надлишку повітря α (змінюючи енергію активації E нехтуємо) при заданих режимних умовах.

Інтегрування залежності (4.16) доцільно виконувати числовим способом у вигляді:

$$\int_0^\chi d\chi = \int_{\theta_1}^\theta \frac{d\theta}{\frac{1}{\theta^2} * e^{-\frac{1}{\theta} - \Omega(\theta - \theta_1)}}. \quad (4.18)$$

Висновки до розділу 4

Розвиток процесу samozапалювання характеризується плавним із постійно зростаючими темпами підйому температурної кривої. Різкий підйом температурної кривої означає настання samozаймання. Значення координати χ , за яких настає різкий підйом температури, дають безрозмірну довжину ділянки samozаймання для початкової безрозмірної температури θ .

Виконаний комплекс досліджень процесу спалювання деревної біомаси доводить необхідність зважати на властивості вибраного виду біомаси для адекватної оцінки параметрів процесу samozаймання.

Із збільшенням температури середовища тривалість загорання зменшується.

Отримані результати математичного моделювання дозволяють використовувати їх для розроблення ефективних конструкцій відповідних паливних пристроїв й ефективного спалювання обраного виду деревної біомаси.

РОЗДІЛ 5

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПАЛИВНЕВИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ЗДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ

Дослідження свідчать про те, що на утворення NO_x під час спалювання твердого палива впливають і конструкція паливній пальників, і спосіб спалювання, і надлишок повітря, і рівень температур у паливневій камері, і час перебування палива й окислювача в зоні високих температур тощо. Оскільки в процесі експлуатації котлів на деревній біомасі значення кожного з чинників, що впливають, виявити складно, то для організації оптимального паливневого процесу за мінімального утворення NO_x потрібні загальні залежності від основних режимних параметрів і умов роботи паливні. Прагнення за допомогою технологічних методів зменшити концентрацію NO_x у димових газах може призвести до порушення оптимальних умов роботи паливневої камери, й до зниження надійності та економічності котлів. Тому питання, що стосуються поліпшення екологічних характеристик, потрібно вирішувати комплексно, а саме разом із оптимізацією паливневого процесу.

Економічність процесу горіння забезпечується завдяки правильному вибору і підтриманню коефіцієнта надлишку повітря. Найекономічнішим є процес горіння, за якого значення коефіцієнта надлишку повітря в паливні є мінімальним, але достатнім для того, аби не було втрати тепла від хімічного недопалу. Економічність процесу горіння палива (у всіх фазах) залежить від правильного розподілу і безперервного підведення повітря, потрібного для горіння. Слід пам'ятати, що для займання і горіння летких горючих треба більше повітря, ніж для підігріву палива й допалювання коксового залишку.

Економічність процесу горіння деревинного пилу підвищується під час спалювання деревної біомаси тоншого помолу, зважаючи на зменшення теплових втрат у паливні (q_3 і q_4). Однак експлуатаційні витрати на подрібнення деревної біомаси (скажімо для приготування деревинного пилу) значно зростають зі збільшенням тонкості помолу. Зіставлення того й іншого дає змогу вибрати

оптимальну величину тонкості помолу. Для економічності процесу горіння зміна подачі палива має супроводжуватися відповідною зміною подачі повітря, що реалізовується співвідношенням паливо - повітря.

Принцип управління економічністю процесу горіння оснований на безпосередньому визначенні коефіцієнта надлишку повітря за даними газового аналізу відхідних паливневих газів. У даному випадку аналізатор управляє кількістю вторинного повітря.

5.1 Визначення оптимального значення коефіцієнта надлишку повітря α_n для процесу спалювання здрібненої деревної біомаси

Для підтримки процесу горіння потрібен кисень (окислювач). У паливнях забезпечують безперевну подачу повітря у достатній кількості для спалювання біомаси і підтримки заданої температури.

Причинами неповного згорання палива можуть бути такі: не всі горючі елементи окисляються, при окисленні горючих елементів утворюються продукти, які б могли брати участь у процесі горіння. За неповного окислення горючих елементів можуть утворитися з'єднання, на прикладі реакції:



Неповне окислення горючих елементів пов'язане з недостатньою подачею окислювача, невідповідною подачею палива і повітря по часу, недостатнім змішуванням палива та повітря. Найбільша кількість теплоти виділяється за повного окислення горючих елементів.

Витрати палива на горіння визначають по повному згоранню палива в паливній котла. Мінімальна кількість повітря V_0 , достатнього для повного згорання одиниці маси палива, називають теоретично необхідною кількістю повітря. Величина V_0 і кількісне співвідношення між масами або об'ємами взаємореагуючих речовин визначають за реакціями окислення горючих елементів [58, 111].

Для реакції ($C + O_2 = CO_2$) на 1 кмоль (12,01 кг) вуглецю використовується 1 кмоль кисню, який має за нормальних умов (температура 20 °С і тиску 0,1 МПа)

об'єм 22,4 м³, або на 1 кг вуглецю необхідно використати 22,4 : 12,01 = 1,866 м³ кисню. Водночас утворюється 1,866 м³ CO₂. На кількість вуглецю C/100 кг в 1 кг палива використовується V^C_{O₂} = 1,866 C/100 м³ кисню і утвориться 1,866C/100 м³ CO₂. Витрата кисню на спалювання водню і сірки і, відповідно, утворених оксидів при спалюванні одиниці маси палива будуть такими (м³/кг):

$$V_{O_2}^H = 5.55 * \frac{H}{100}; \quad (5.2)$$

$$V_{O_2}^S = 0.7 * \frac{S}{100} = 0.375 * 1.866 * \frac{S}{100}; \quad (5.3)$$

$$V_{H_2O}^H = 11.1 * \frac{H}{100}; \quad (5.4)$$

$$V_{SO_2}^S = 0.7 * \frac{S}{100}. \quad (5.5)$$

Зі співвідношень (5.2) – (5.5), з урахуванням об'ємного вмісту кисню у повітрі (21%) і паливі O/(100 PO₂), отримуємо кількість повітря, теоретично необхідного для повного окислення горючих елементів:

$$V^0 = \frac{V_{O_2}^0}{0.21} = 0.0476 * \left[1.866 * (C + 0.375S) + 0.265H - \frac{O}{\rho_{O_2}} \right] \quad (5.6)$$

або

$$V^0 = 0.0889(C + 0.375S) + 0.265H - 0.0333 * O. \quad (5.7)$$

де C, S, H і O – масові частки (%) горючих елементів і кисню у даному паливі.

Переважно V⁰ розраховують для робочої маси палива. Для запобігання неповного згорання палива у паливню подають кількість повітря V_в більше теоретично необхідного [58].

Під час проектування котлів і аналізу їх роботи використовують коефіцієнт надлишку повітря α_п, який дорівнює відношенню фактично поданої кількості повітря до теоретично необхідної:

$$\alpha_n = V_e / V^0. \quad (5.8)$$

Для поліпшення умов перебігу процесу згорання і зниження емісії частинок у продуктах згорання витрата повітряного дуття регулюється, поступово змінюючись від верхніх до нижніх секцій котла. Для забезпечення старанного перемішування продуктів згорання повітря має подаватися в напрямі, протилежному виходу димових газів із паливни котла [58].

Втрати теплоти у процесі спалювання дрібненої деревної біомаси визначають за допомогою газового аналізу складу димових газів, застосовуючи відповідні сучасні прилади [111].

Результатами аналізу є температура димових газів, вміст CO_2 , O_2 і CO , на основі яких може бути визначено основну частину втрат.

Втрати теплоти визначаються температурою відпрацьованих газів і коефіцієнтом надлишку повітря α_p , який визначається зі співвідношення між дійсною кількістю повітря, поданого у паливню, і кількістю повітря, теоретично необхідною для повного згорання [58]:

$$\alpha_p = CO_{2max} / CO_{2вим}, \quad (5.9)$$

де $CO_{2,max}$ – максимально можливий вміст вуглекислого газу для певного виду палива (таблиця 5.1) [114].

Таблиця 5.1

Значення CO_{2max} для деяких видів палива

Паливо	$CO_2, \text{max}, \%$
Кам'яне вугілля	18,8
Рідке паливо	15,9
Деревина	20,2
Торф	19,6
Природний газ	12,1

Сучасні газоаналізатори не виміряють безпосередньо вміст вуглекислого газу, а визначають його за вмістом кисню з рівняння [45, 80]:

$$CO_{2.вим} = CO_{2.max} * \left(1 - \frac{O_2}{20.94}\right). \quad (10)$$

Оптимальне значення коефіцієнта надлишку кисню завжди повинно бути $\alpha_{\text{п}} > 1$ і залежить від технології спалювання та виду палива. Для повного спалювання деревини складно забезпечити рівномірний розподіл повітря по всій зоні горіння.

Автором виконано експериментальні дослідження складу димових газів під час спалювання подрібненої деревини верби *Salix* (3-річного віку). Результати вимірювань вмісту кисню та вуглекислого газу подано на рис. 5.1. Для ефективного перебігу процесу горіння верби *Salix* значення коефіцієнта $\alpha_{\text{п}}$ є в межах 1,2–1,31 (рис. 5.1). Тоді у димових газах буде приблизно 7,5% O_2 і 13% CO_2 .

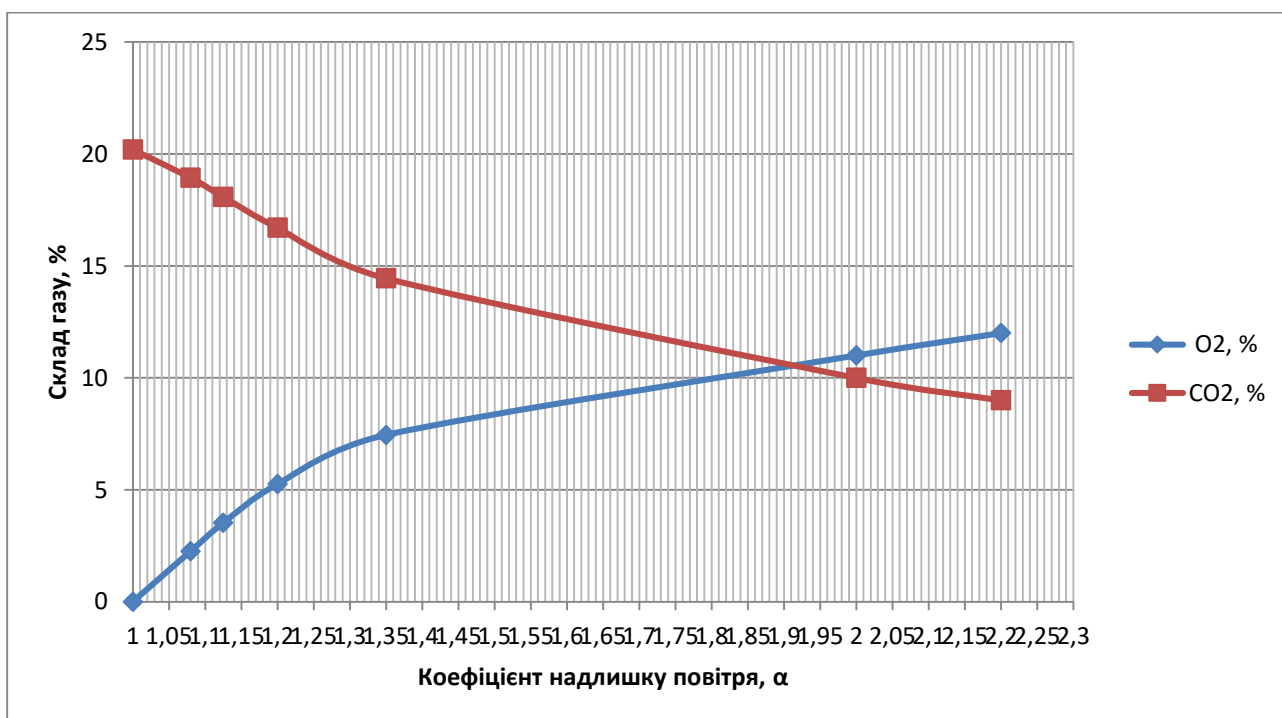


Рис. 5.1. Рациональний коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_{\text{п}}$ для ефективного спалювання біомаси

Із проведених досліджень можна зробити висновок, що максимальне значення $\alpha_{\text{п}}=2,0$ можливе у разі спалювання полін; середні значення (1,4–1,6) бажані для колотої деревини; а нижчі (1,01–1,3) – для тирси, брикетів, гранул, подрібненої дреревної біомаси. Тому з метою ефективного спалювання біомаси потрібно регулювати подачу повітря у камеру згорання [111, 112] та забезпечувати коефіцієнт надлишку повітря у діапазоні від 1,2 до 1,35.

Досліди з визначення оптимального значення коефіцієнта надлишку повітря виконувалися під час спалювання деревної тріски і суміші деревної тріски та верби енергетичної.

Зміна вмісту кисню проводилась впливом на задавач регулятора концентрації кисню.

Результати дослідів подані у Додатку 3.

Для експериментального зразка котла критичні значення коефіцієнта надлишку повітря (прийняті за оптимальні) й складають $\alpha_{кр} = 1,22 - 1,37$ у діапазоні навантажень 100–50% номінального, як під час спалювання деревної тріски, і під час спалювання суміші деревної тріски й верби.

5.2 Удосконалення конструкції паливні для спалювання здрібненої деревної біомаси

Кількість котелень на біопаливі для вироблення теплової енергії шляхом спалювання здрібненої деревної біомаси невпинно зростає. Проблемою спалювання здрібненої деревної біомаси є підвищення ККД паливного пристрою і установки в загальному. Підвищення ККД паливні може бути досягнуте за допомогою вдосконалення її конструкції та підтримування відповідного режиму спалювання біопалива.

Автором на основі проведених досліджень розроблено головні рішення стосовно побудови котельні на основі здрібненого деревного біопалива з підвищеним коефіцієнтом корисної дії.

Комплекс котельні є логічною системою взаємозв'язків для забезпечення та доставки біопалива до будівлі котельні, зберігання і подачі біопалива, його спалювання та отримання теплової енергії. До його складу входить:

- система приймання, складування та подачі біопалива (паливний приймач, завантажувач, паливний склад);
- система подрібнення біомаси до заданого фракційного складу;
- система спалювання біопалива з виробництвом теплової енергії;
- система аспірації димових газів;

- система золовидалення;
- система контролю та управління (система автоматичного регулювання дозування подачі палива й управління процесами оптимального горіння і теплообміну в котлі).

Для забезпечення технологічності виготовлення обладнання котельні, зменшення обсягу монтажних робіт, підвищення рівня ремонтпридатності й зручності обслуговування, обладнання котельні пропонується згрупувати в модулі.

Оцінка перспективності того чи іншого проєкту має враховувати не тільки обсяг капітальних вкладень на впровадження технології, а й подальшу економію ресурсів вупроцесі генерації енергії на котельнях.

Враховуючи технічні особливості відомих технологій спалювання палива, можна стверджувати, що для котлів невеликої потужності оптимальним рішенням є спалювання локальних твердих видів палива – біомаси.

Унаслідок цього актуальним завданням є розвиток і вдосконалення нових технологій для спалювання різної деревини, а саме: вживаної, швидкоростучої, відходів деревообробного виробництва тощо [12–14, 76–80].

Вибір твердопаливного котла визначається місцевою енергетичною ресурсною базою, а саме наявністю відходів деревообробної промисловості, лісгоспів, сільсько-господарського виробництва, корисних копалин (торф, буре, кам'яне вугілля тощо).

Нині часто потрібно зробити вибір між газовими котлами (які є найзручнішими за способом постачання палива) і твердопаливними. Нами виконано розрахунок економічності заміщення деревним паливом природного газу для котлів потужністю 1–2 МВт (найпоширеніші котли для енергозабезпечення комунально-побутових і промислових підприємств). У таблиці 5.2 подано результати розрахунку кількості деревини, потрібної для забезпечення відповідної потужності для котлів із різним коефіцієнтом корисної дії. На рис.5.2 подано вартість заміщення деревиною енергії, яка виробляється під час спалювання 1000 м³ газу [110].

Таблиця 5.2

Розрахунок кількості відходів деревини для використання їх як палива у котлах потужністю 1 та 2 МВт

Вид деревного палива	Потужність котельної установки, МВт					
	1			2		
	ККД, %					
	87	90	93	87	90	93
	Необхідна кількість палива, м ³ /добу					
Суміш деревини сосни, берези і осики ($Q_{н^p}=14400$ кДж/кг, $W=20$ %)	22,75	22,17	21,6	45,79	44,35	42,91

Із табл.5.2 видно, що головна перевага твердопаливного котла над газовим котлом – це низька вартість нетрадиційних видів палива (деревини та/або її відходів) порівняно з природним газом.

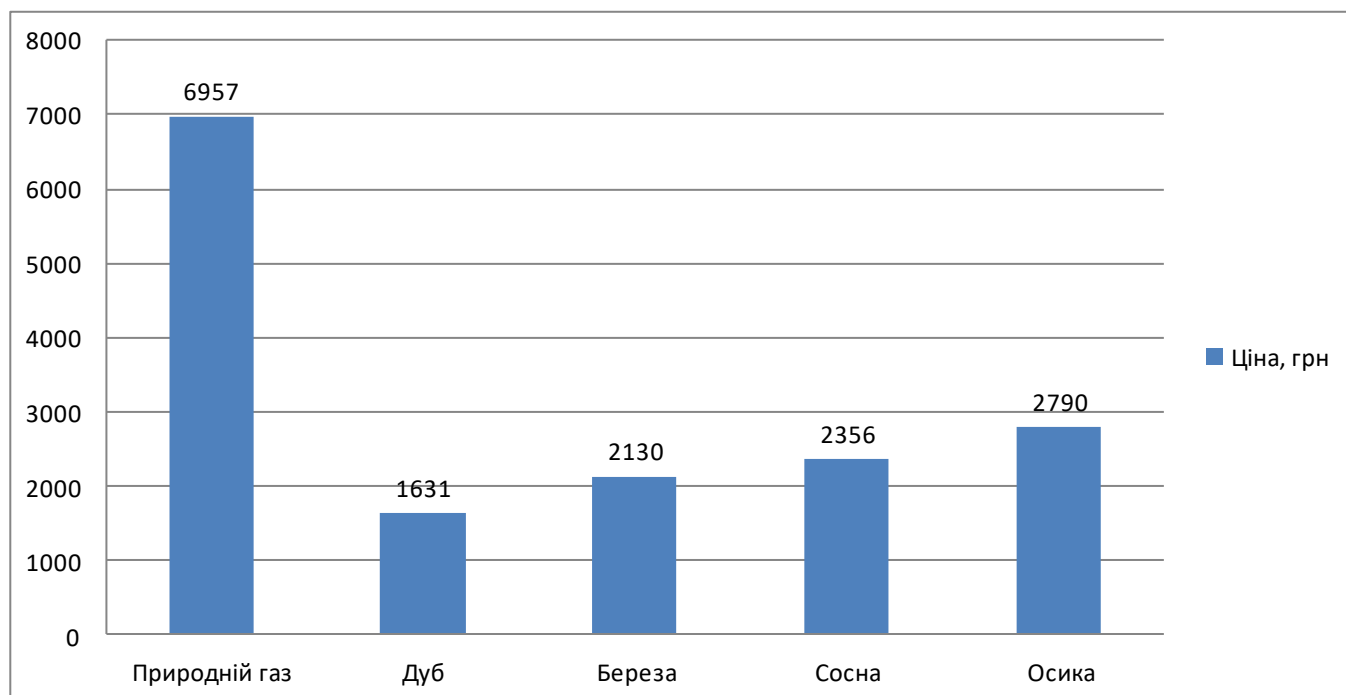


Рис. 5.2. Вартість заміщення деревиною теплової енергії, яка виробляється під час спалювання 1000 м³ газу

Деревина є матеріалом, фізико-хімічні властивості якого змінюються у процесі нагрівання та горіння. Для оцінки енергетичної цінності деревини та її відходів здійснено дослідження теплофізичних, теплотехнічних і кінетичних параметрів [16–18, 71–74]. За результатами виконаних досліджень встановлено, що теплотехнічні характеристики деревної біомаси загалом є такими: теплотворна здатність змінюється в межах від 12 до 19 МДж/кг, зольність є незначною від 0,8 до 1,5%, вологість 10–40%. Фізико-механічні характеристик, такі як щільність, розміри частинок можуть бути змінені за допомогою подрібнення та ущільнення. Тому для підвищення енергоефективності спалювання біомаси і зниження рівня забруднювальних речовин потрібно враховувати вказані характеристики під час підготовки палива.

Виокремлено групу порід, які широко використовуються як паливо для спалювання в твердопаливних котлах, зокрема: сосна, береза, осика, вільха, верба швидкоростуча (*Salix Viminalis*). Для цієї групи порід досліджено теплотехнічні та кінетичні параметри [34, 43, 71–74, 76–80] та удосконалено математичну модель спалювання подрібненої деревної біомаси [4, 5]. Наявність такої моделі та експериментально отриманих значень кінетичних параметрів окремих порід створює базу для дослідження процесу спалювання не лише окремих чистих порід, а й їх сумішей. Отже, підготовлено теоретичну базу для аналізу процесів спалювання сумішей деревної біомаси вказаних порід та удосконалено відповідні паливні пристрої.

На основі результатів здійснених досліджень нами розроблено конструкцію паливни для забезпечення максимального ККД під час спалювання подрібненої деревної біомаси. Конструкція цієї паливни подана на рисунку 5.3.

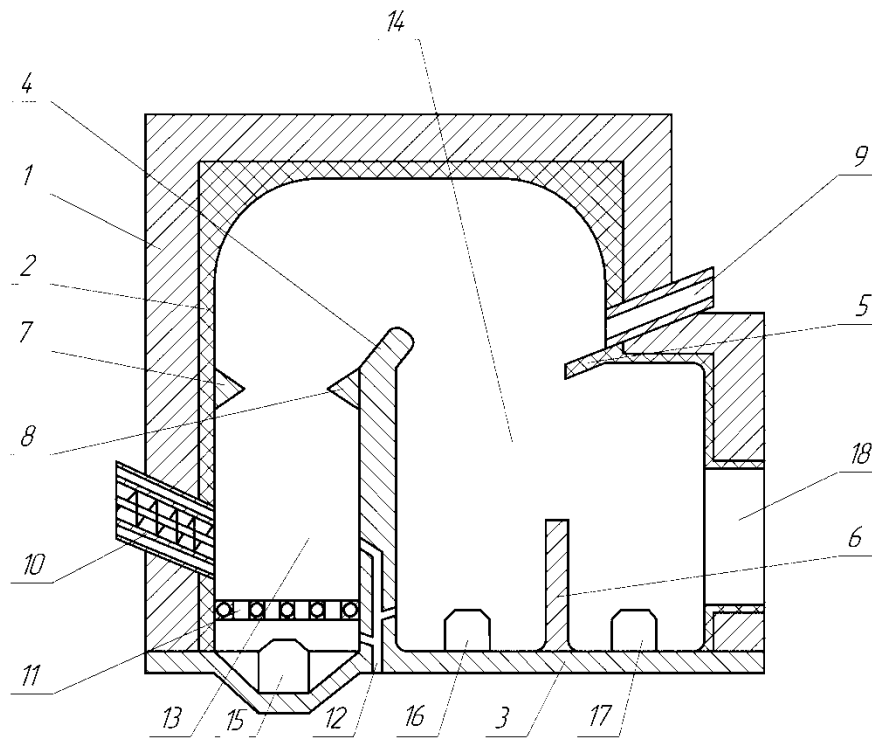


Рис.5.3. Камерна паливня для спалювання здрібненої деревної біомаси [111]

1, 2 – обмурівка паливні; 3 – підлога паливні; 4 – робоча перегородка з закрилкою; 5 – дашок; 6 – допоміжна перегородка; 7, 8 – виступи; 9 – пальник для допалювання; 10 – шнекова подача палива; 11 – економайзерна колосникова решітка; 12 – трубка для подачі підігрітого повітря; 13 – основна камера; 14 – камера допалювання; 15, 16, 17 – люки для видалення золи; 18 – отвір виходу димових газів.

Паливня сконструйована так (рис. 5.3). Подрібнена деревна біомаса за допомогою шнекової подачі 10 з одночасною подачею повітря для інтенсифікації горіння подається в основну камеру спалювання 13, та підпалюється за допомогою факела знизу через економайзерну колосникову решітку 11 через люк у нижній частині підлоги паливні 3. Для підтримання процесу спалювання деревної біомаси подається підігріте повітря через трубу 12, яка розміщена у середині робочої перегородки 4. Для активного перемішування паливної суміші та рівномірного її розподілу в площині колосникової решітки шнекова подача 10 розміщена під кутом до підлоги паливні 3. Також для створення додаткового завихрення продуктів спалювання у верхній частині камери згорання 13 на внутрішній обмурівці 2 та на робочій перегородці 4 передбачено виступи 7 і 8. Завдяки наявності цих виступів вихор, сформований в основній камері спалювання

13, забезпечує повніше перемішування і вигорання палива навіть при малому надлишку повітря, а це сприяє зниженню рівня утворення окислів азоту в продуктах згорання.

Перша стадія допалювання крупніших частинок палива передбачена у верхній частині камери спалювання 14. Для цього над дашком 5, що встановлений під кутом до підлоги паливні, розміщений пальник 9 для допалювання. Друга стадія допалювання найкрупніших частинок палива відбувається у нижній частині камери допалювання, яка розділена допоміжною перегородкою 6. Так створюється додаткове завихрення потоку для ефективнішого допалювання крупніших частинок. Для видалення золених відкладень передбачені люки 15–17. Вихід димових газів здійснюється через отвір 18 збоку в стінці камери допалювання. Таке розміщення забезпечує ефективне спалювання та безпечний вихід димових газів.

Використання запропонованої конструкції паливні має такі переваги:

- можливість спалювати паливо з високим вмістом вологи ($W=20\dots40\%$);
- збільшення часу перебування часток палива в паливному об'ємі паливні, конструкція якої передбачає два виступи для створення вихору в основній камері згорання, а також додатковий пальник у камері допалювання, за допомогою якого створюється додатковий вихор спалюваної деревної суміші;
- більш ефективніший розподіл теплових потоків, який забезпечується запропонованими вдосконаленнями, а саме – стеля основної камери спалювання та камери допалювання виконана півсферичної форми;
- для більш ефективного спалювання деревної біомаси передбачено одночасну подачу повітря для інтенсифікації горіння в основній камері згорання сумісно з шнековою подачею деревної біомаси;
- використання економайзерної колосникової решітки зменшує енергетичні затрати на підігрів води та затрати в металі на виготовлення колосникової решітки.

Конструкція паливні, зображена на рис. 5.3, пропонується для застосування у котлах малої та середньої потужності. Для котлів середньої та великої потужності

запропоновано іншу конструкцію, яка передбачає подавання здрібненої деревної суміші на обертову колосникову решітку.

Запропоновану конструкцію паливни зображено на рис. 5.4.

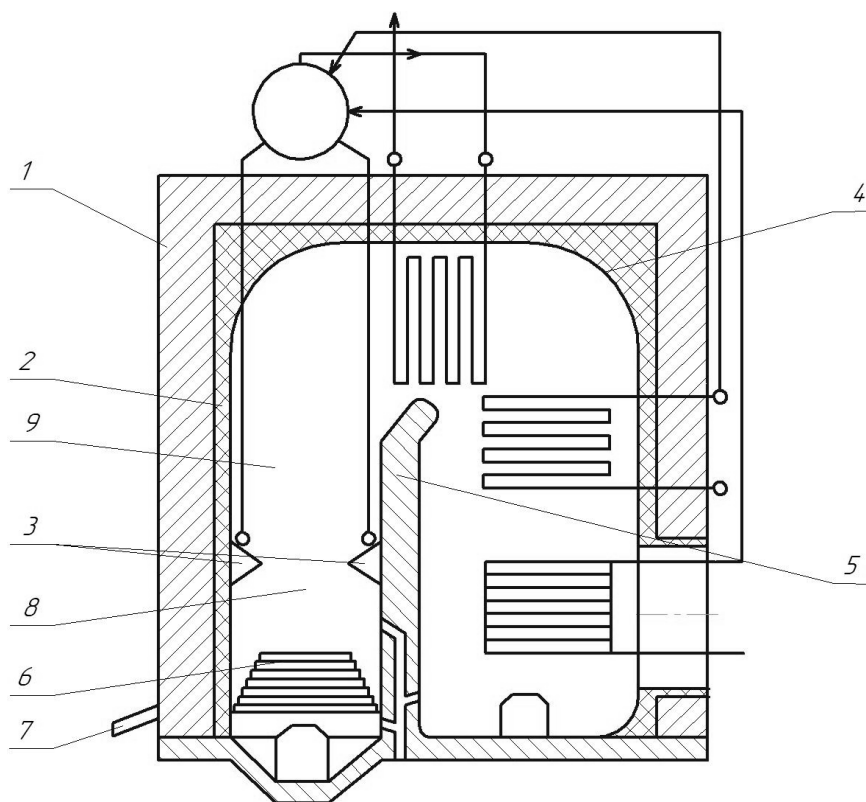


Рис. 5.4. Камерна паливня із обертовою колосниковою решіткою для спалювання здрібненої деревної біомаси

1, 2 – обмурівка паливни; 3 – пережим; 4 – півсферична стеля паливни; 5 – розділююча стінка з закрилкою; 6 – обертова колосникова решітка; 7 – шнекова подача палива; 8 – камера згорання; 9 – секція догорання.

Паливну камеру пропонуємо обладнати обертовою колосниковою решіткою для спалювання твердого палива (кора, тирса, тріска тощо) у шарі, що дає змогу спалювати паливо з вологістю до 65% без зниження потужності. Така решітка має конусну форму, що сприяє переміщенню деревної суміші по рухомих кільцях. Так відбувається підсушування суміші й одночасне згорання сухої фракції.

Як розрахункове паливо для котельного агрегату прийнято паливну суміш: деревна тріска – 70%, верба енергетична – 30%.

Камера згорання (ПК) є висхідним газоходом. У нижній частині ПК розташована колосникова решітка (КР); ПК має циліндричну форму. Вгорі ПК виконаний пережим, що переходить у секцію догорання.

Камера згорання, пережим і секція догорання екрановані газощільними панелями, що утворюють випарні поверхні нагріву. Фронтний зкран у верхній частині утворює стелю.

Задня стінка ПК є передньою стінкою конвективної шахти (КШ).

Конвективна шахта котла є опускним газоходом. Стеля, задня і бокова стіна КШ екрановані газощільними панелями, включеними у випарну систему котла.

У нижній частині КШ розташований конвективний випарник.

Разом паливневі екрани і панелі КШ утворюють екранну коробку.

Для видалення золи з відхідних газів використовується електрофільтр.

Система подачі палива складається з: накопичувача, стрічкового транспортера звідки паливо за допомогою гідравлічних штовхачів, проходячи через пристрій вирівнювання подачі, надходить на стрічковий транспортер, оснащений магнітом для видалення металевих предметів. Далі паливо проходить через просіювач, призначений для уловлювання довгомірних предметів і ланцюговим скребковим транспортером подається в накопичувач.

Накопичувач діє як паливний буфер для КР. У накопичувачі двома розвантажувальними шнеками паливо подається на живильний стокер-шнек, і за допомогою останнього – на центр КР.

Шнек встановлений консольно у дещо похилому положенні. Крок шнека збільшується до вільного кінця. Продуктивність подаючого шнека встановлюється залежно від продуктивності котла.

Основним елементом удосконаленої паливни є колосникова решітка (КР) безпровального типу; КР – кругла, має конічну форму і розташована в нижній частині камери згорання (ПК). Діаметр КР розрахований за умови повного згорання палива.

Колосникова решітка складається з кілець різного діаметра. Верхнє кільце має найменший діаметр. Кожне наступне кільце є більшого діаметра й розташована з невеликим перекриттям під кільцем меншого діаметра так, що вони утворюють сходинки. У сходах виконані отвори для подачі первинного потоку повітря. Нижнє кільце – плоске. Непарні кільця – обертові, парні – нерухомі. Обертання кожного

наступного кільця – зустрічне.

Завдяки руху кілець КР паливо переміщається від центру КР до її країв, і водночас повністю згорає. Згорання відбувається, перед тим як паливо досягне останнього кільця колосникової решітки. Привід решітки електричний (гідрравлічний).

Управління інтервалами між спрацьовуванням кілець КР дає змогу досягти потрібної швидкості переміщення палива залежно від горючих властивостей окремих видів палива.

Зола видаляється з останнього кільця КР, оснащеного скребками та приводиться в рух електродвигунами. Це кільце КР скидає шлак і золу в накопичувач шлаку під решіткою (піддон).

Пережим ефективно відбиває випромінюване тепло від вогнетривкої футеровки і полум'я в центр КР, що поліпшує процес висушування сирого палива, що потрапляє на решітку.

Повне згорання решти газів і частинок забезпечується в секції догорання ПК.

Первинне повітря потрапляє в камеру згорання через спеціальні отвори в пластині решітки й через шар палива, вторинне – через сопла, розташовані по периметру нижньої частини ПК і в верхній частині ПК, третинне – через сопла, розташовані в секції догорання ПК.

За допомогою розподілу витрат повітря по потоках здійснюється управління процесом спалювання палива в паливні, що забезпечує повне згорання його, причому більша частина золи залишається в паливні і видаляється з неї, а не виходить в навколишнє середовище разом із димовими газами.

Проведення дослідів, методика вимірювань параметрів, здійснення розрахунків і оформлення результатів випробувань виконувалося відповідно до чинних нормативних документів [96–99, 102–107, 109].

Основні формули розрахунку величин, наведених у зведених таблицях результатів дослідів, і подані в Додатку 2.

Температура холодного повітря в розрахунковій формулі q_2 прийнята як температура повітря на вході у систему (перед дуттєвим вентилятором) і становить

25°C.

Поправочні коефіцієнти на зміну режимних параметрів визначалися за допомогою експериментального й аналітичного методів.

Вимірювання температур повітря і димових газів по газоповітряного тракту здійснювалися з використанням додатково встановлених (переносних) приладів і реєстраторів.

Виміряні витрати перегрітої пари, живильної води приводилися до розрахункових параметрів вимірювальних діафрагм.

Температура вимірювалася цифровим термоелектричним термометром ТТЦ-1200.

Технічний склад палива – деревної тріски і суміші деревної тріски й верби енергетичної: калорійність (Q_H^p), зольність (A^p, A^c), вологість (W^p), вміст сірки (S^p), визначався за загальноприйнятими методиками.

Відбір проб продуктів згорання для визначення характеристик паливневого процесу проводився з газоходу. Аналіз відпрацьованих газів здійснювався автоматичним газоаналізатором «Testo-330». Об'ємний вміст кисню (O_2), оксиду вуглецю (CO) і оксидів азоту ($NO_x = NO + NO_2$) визначався згідно з [96, 103–105, 108]. Для дублювання показань і визначення об'ємного вмісту діоксиду сірки (SO_2) у вихідних газах паралельно проводився аналіз продуктів згорання автоматичним газоаналізатором «Testo-350».

Розрахунок енергетичних характеристик експериментального зразка котла під час спалювання деревної тріски й суміші деревної тріски та енергетичної верби в співвідношенні 70/30 відповідно поданий у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Розрахункова таблиця для енергетичних характеристик експериментального зразка котла при спалюванні суміші
деревної тріски і енергетичної верби в співвідношенні 70/30 відповідно і деревної тріски

Назва параметра	Числове значення параметра									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1										
Паропродуктивність котла, т/год	22,9	19,4	16,5	12,8	10,2	21,6	18,6	15,0	12,0	9,4
Тиск перегрітої пари, бар	61,6	61,5	61,5	61,4	61,4	61,5	61,5	61,4	61,5	61,5
Температура перегрітої пари, °С	485	485	485	468	452	485	485	485	483	460
Ентальпія перегрітої пари, ккал/кг	808,5	808,0	808,4	798,4	789,0	808,2	808,2	808,2	807,4	793,8
Теплопродуктивність, Гкал/год	15,52	13,11	11,17	8,56	6,72	15,17	13,03	10,52	8,39	6,44
Температура повітря на вході в систему, °С	25									
Коефіцієнт надлишку повітря, α_{bc}	1,28	1,28	1,28	1,30	1,33	1,28	1,29	1,30	1,32	1,33
Температура відхідних газів, °С	162,2	159,2	151,2	148,0	145,9	148,9	140,5	134,5	128,8	121,7
Паливо	суміш деревної тріски і енергетичної верби, 70/30					деревна тріска				
Нижча робоча теплота згорання, Q_n^p , кДж/кг	8500					8100				
Волога робоча, W_p , %	45,4					48,9				
Волога приведена, W_n , %/кДж/кг	5,5					5,9				
Зольність робоча, A_p , %	6,2					1,2				
Вміст горючих в шлаці, $C_{шл}$, %	3,8					1,4				
Частка виносу з золою / шлаком, [-]	0,15/0,85									

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Втрати тепла з відхідними газами, q_2 , %	9,574	9,367	8,842	8,739	8,723	8,877	8,341	7,984	7,642	7,201
Втрати тепла з хімічним недопалом, q_3 , %	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Втрати тепла з механічним недопалом, q_4 , %	0,825	0,821	0,821	0,824	0,826	0,062	0,058	0,059	0,058	0,060
Втрати тепла в навколишнє середовище, q_5 , %	1,088	1,286	1,511	1,942	2,441	1,153	1,343	1,664	2,085	2,667
Втрати тепла з фізичним теплом шлаку, q_6 , %	0,291	0,291	0,291	0,291	0,291	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
ККД котла бруто, %	88,22	88,23	88,54	88,20	87,72	89,85	90,20	90,24	90,16	90,02
ККД котла нетто, %	87,02	86,95	87,30	86,77	86,02	88,60	88,90	88,78	88,47	88,10
Витрата натурального палива, т/год	8,88	7,50	6,37	4,90	3,87	8,57	7,34	5,92	4,73	3,63

Висновки до розділу 5

Проведені дослідження свідчать, що у процесі розрахунку котлів для спалювання деревної біомаси необхідно враховувати її основні фізико-хімічні характеристики. Процес спалювання деревної біомаси також потребує регулювання подачі повітря, відповідно до вологості та фізико-хімічних властивостей сировини, тобто врахування значення коефіцієнта надлишку повітря. Оптимальне значення коефіцієнта надлишку кисню α_n потрібно забезпечити у діапазоні від 1,1 до 1,35. Ефективність процесу горіння палива забезпечує економічність роботи котла і сприяє захисту навколишнього середовища від забруднення.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведено результати вирішення науково-технічної задачі, яка полягає у підвищенні ефективності енерготехнологічного процесу спалювання здрібненої деревної біомаси. За результатами проведених аналітичних та експериментальних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Виконано аналіз особливостей процесу спалювання здрібненої деревної біомаси з розміром частинок від 0,08 мм до 1 мм, теплоенергетичних характеристик і паливневих пристроїв та встановлено, що для спалювання здрібненої деревної біомаси доцільно застосовувати паливні камерного типу, які дають змогу спалювати здрібнену суміш різних фракцій, зокрема і пилоподібної (розмір фракцій не більше 200 мкм), та отримувати високий коефіцієнт корисної дії, що сягає 90%.

2. Визначено діапазони зміни безрозмірних параметрів процесу спалювання здрібненої деревної біомаси, що дало можливість застосувати математичну модель процесу теплового самозаймання деревної біомаси та дослідити особливості перебігу цього процесу з урахуванням та без урахування тепловідведення і сформулювати вимоги до ефективного спалювання деревної біомаси в паливневих пристроях.

3. Розроблено методику розрахунку кінетичних констант процесів термічного розкладання деревної біомаси з використанням модифікованого кінетичного рівняння та рівнянь, отриманих за методом найменших квадратів; розроблену методику застосовано для обчислення значень кінетичних констант процесів термічного розкладання деревної біомаси на основі результатів термогравіметричних досліджень зразків деревної біомаси; отримані значення кінетичних констант застосовано для моделювання процесу спалювання зразків деревини і створених на їхній основі сумішей.

4. За результатами експериментальних досліджень зразків верби енергетичної *Salix* визначено кінетичні параметри (енергію активації, передекспоненційний множник) процесу спалювання для діапазону значень ступеня перетворення $\alpha \leq 0,55$, що дає змогу проаналізувати кінетику спалювання цієї породи деревини у

паливневих пристроях енергетичних установок.

5. На основі результатів термогравіметричного аналізу вперше отримано аналітичні залежності відносної втрати маси зразка верби енергетичної *Salix* від оберненої температури зразка, що дає можливість проаналізувати перебіг стадій процесу горіння зразка та сформуванати вимоги до умов спалювання цієї породи, зокрема, часу перебування деревних частинок у паливневих пристроях.

6. За результатами комплексного термічного й елементного аналізу встановлено вплив віку верби енергетичної *Salix Viminalis* на її теплоту згорання, зокрема встановлено, що теплота згорання зростає із збільшенням віку деревини на 10,2 %/рік, що дає змогу застосувати ці результати під час розроблення паливневих пристроїв для спалювання швидкоростучих порід деревини.

7. Визначено вплив коефіцієнта надлишку повітря α_n на паливневий режим при спалюванні генетично модифікованої деревини, зокрема, за результатами експериментальних досліджень процесів спалювання здрібненої деревної біомаси підтверджено, що для формування ефективного процесу горіння деревної біомаси потрібно забезпечити значення коефіцієнта α_n у діапазоні від 1,1 до 1,35.

8. Удосконалено конструкцію паливного пристрою для спалювання здрібненої біомаси, яка відрізняється наявністю виступів в основній камері згорання та півсферичною стелею камер згорання та допалювання для створення додаткового вихору спалюваної деревної суміші, що забезпечує ефективний розподіл теплових потоків і повне спалювання здрібненого деревного палива.

9. Удосконалено конструкцію паливного пристрою для спалювання здрібненої деревної біомаси шляхом введення конусної рухомої колосникової решітки, що забезпечує активний контакт поверхні здрібнених частинок деревини та кисню і дає можливість зменшити втрати з механічним недопалом. Використання паливень запропонованої конструкції дозволяє підвищити ККД котельного агрегату на $1,0 \div 2,0\%$.

10. Впроваджено вдосконалення паливного пристрою під час переводу міні-котельні з спалювання природного газу на спалювання відходів деревини на

підприємстві ПАТ «ДМЗ». Запропоновані вдосконалення в комплексі з заміною виду палива забезпечили значне зменшення витрат на оплату енергоносіїв, одночасно зменшуючи шкідливий вплив продуктів згорання на екологічний стан довкілля.

11. Впроваджено удосконалену конструкцію камерної паливни з обертовою колосниковою решіткою на Україно-чеському СП «Ройек-Львів». Використання запропонованої конструкції паливни у кінцевому результаті забезпечило підвищення коефіцієнта корисної дії експериментального зразка котельного агрегату на 1,4%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Міністерство палива та енергетики України. 2006.
2. Місце біоенергетики в проекті оновленої Енергетичної стратегії України до 2035 року : аналітична записка БАУ. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics
3. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 року: аналітична записка БАУ. 2020. № 26. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics
4. Гелетуха Г. Г., Железная Т. А. Обзор современных технологий сжигания древесины с целью выработки тепла и электроэнергии. Часть 1. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 1999. № 5. С. 3–12. URL: <http://biomass.kiev.ua/images/library/articles/wood1.pdf>
5. Гелетуха Г. Г., Железная Т. А. Обзор современных технологий сжигания древесины с целью выработки тепла и электроэнергии. Часть 2. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 1999. № 6. С. 3–13. URL: <http://biomass.kiev.ua/images/library/articles/wood2.pdf>
6. 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
7. Гелетуха Г. Г. Енергозабезпечення України: погляд у 2050 рік. *Зелена енергетика*. 2003. № 4. С. 7–10.
8. Маляренко В. А., Лисак Л. В. Енергетика. Довкілля. Енергозбереження. Х. : Рубікон, 2004. 400 с.
9. Dumych V., Paskaryk V. Proekt vykorystannya tverdoho biopalyva dlya opalennya obyektiv vyrobnychoyi i sotsialnoyi sfery v silskiy mistsevosti // Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi tekhniky i tekhnolohiy dlya silskoho hospodarstva Ukrayiny. 2013. Vyp. 17 (2). P. 310–318. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ttar_2013_17\(2\)_41](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ttar_2013_17(2)_41)

10. Василичин Р. Д. Енергетика лісових екосистем: основні напрями та тенденції наукових досліджень. *Науковий вісник НЛТУ України* : зб. наук.-техн. праць. Львів : РВВ НЛТУ України. 2013. Вип. 23.2. С. 31–36.
11. Дейнека А. М. Лісове господарство: еколого-економічні засади розвитку : монографія. К. : Знання, 2009. 350 с.
12. Фурдичко О. І., Паштецький В. С. Проблема оптимізації використання природно-ресурсного потенціалу певного регіону. *Агроекологічний журнал*. 2013. № 1. С. 17–24.
13. 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.
14. 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.
15. Гелетуша Г. Біоенергетика на задвірках. *Економічна правда*. URL: <http://www.epravda.com.ua/columns/2013/03/20/366395/>
16. Лотош В. Е. Переработка отходов природопользования. Екатеринбург : Полиграфист, 2007. 503 с.
17. Медведев С. О., Степень Р. А., Соболев С. В. Движение древесной биомассы в перспективном развитии лесосибирского промышленного комплекса. *Хвойные бореальной зоны*. 2010. № 3–4 (XXVII). С. 341–345.
18. Хвесик М. А., Шубалий О. М., Василик Н. М. Комплексне використання лісоресурсного потенціалу: механізм стимулювання, інституціональне та інноваційно-інвестиційне забезпечення : монографія. К.: ТОВ «ДКС», 2011. 498 с.
19. 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>

20. Mysak Y. S., Yalchko 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.
21. Удовиченко Г. А Досвід виробництва альтернативних екологічно чистих видів палива на Полтавщині. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2010. № 3. 159 с.
22. Бернадинер М. Н., Шурыгин А. П. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. М. : Химия, 1990. 301 с.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Ялечко В. І., Гнатишин Я. М., Муха О. В. До питання використання деревної біомаси. *Нафтогазова енергетика 2013: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції* (м. Івано-Франківськ, 7–11 жовтня 2013 р.). Івано-Франківськ. С. 200–202.
27. Hnatyshyn Y. M., Yalchko 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.
28. Hnatyshyn Y., Yalchko V., Mukha O. Математичне моделювання впливу властивостей біопалива на процес спалювання / Mathematical modeling influence of properties of biofuel on burning process // Zborník vedeckých prác v rámci projektu Nové technológie pre energeticky environmentálne a ekonomicky efektívne zhodnocovanie biomasy ITMS: 26220220063. MEDZINÁRODNÁ VEDECKÁ KONFERENCIA A OTVORENIE CENTRA VVICB - 06.–08.11.2013, VVICB – Капуňаны при Пре́нове, BARDEJOVSKÉ KÚPELE. P. 70.
29. Дзюпин О. В. Утилізація відходів деревини з отриманням тепла. *Будмайстер*. 2000. № 8. С. 8–11.
30. 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.
31. 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.
32. Головков С. И., Коперин И. Ф., Найденов В. И. Энергетическое использование древесных отходов. М. : Лесн. пром-сть, 1987. 224 с.
33. Дзяди́кевич Ю. В., Розум Р. І., Буряк М. В. Особливості процесу спалювання деревної біомаси та шляхи його покращення. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2010. № 10. С. 41–45.
34. Ялечко В. І., Кочубей В. В., Гнатишин Я. М., Павловський Ю. П. Термічний аналіз деревини верби *Salix viminalis*. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів : НЛТУ, 2016. № 26.4. С. 247–251.
35. 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

36. Рудаков Ю. А. Особенности развития лесной промышленности в Финляндии. *Наука и бизнес: пути развития*. 2013. № 2. С. 47–50.
37. Resources traditionally mean the amount of timber in the forest. URL: <http://www.forest.fi/smyforest/foresteng.nsf/allbyid/94CB181B01FC2162C2256F25003DF67A?Opendocument>
38. 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.
39. С. С. Лис, Я. М. Гнатишин, В. І. Ялечко Теплогенератор з вихровою ежекцією генераторного газу. Патент України на корисну модель № 51768 МПК F26B 23/00 (2009). 26.07.2010. Бюлетень № 19.2010.
40. Vis M. Harmonization of biomass resource assessments. Vol. I: Best practices and methods handbook. Report on WP5 of the EC FP7 Project "Biomass Energy Europe", 2010. BTC Biomass Technology Group B.V., the Netherlands. URL: <http://www.eu-bee.com>.
41. 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)
42. 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.
43. 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.

44. Renewable Energy Road Map (Дорожня карта з відновлювальних джерел енергії). COM (2006) 848 final, 10.01.2007.
45. Brandstätter M. Rest-und Altholz; Anfall und Vermertung in osterreich. Holzforschung und Holzverwertung. 1994. No 3. S. 46–48.
46. 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.
47. Дудюк Д., Мазепа С., Гнатишин Я. Нетрадиційна енергетика: навч. Посіб. Львів : «Магнолія 2006», 2008. 188 с.
48. Мисак Й., Гнатишин Я., Івасик Я. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив : навч. посіб. Львів : Видавниц. Націонал.універс. «Львівська політехніка», 2002. 136 с.
49. IER (2006). Renewable Energy Policy in Ukraine. Working Paper No. V6. Institute for Economic Research and Policy Consulting.
50. IER (2006a). Overview on Renewable Energy in Agriculture and Forestry in Ukraine. Working Paper No. 6. Institute for Economic Research and Policy Consulting.
51. Перспективи виробництва електричної енергії з біомаси в Україні: аналітична записка БАУ. 2013. № 5. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics
52. Перспективи виробництва теплової енергії з біомаси в Україні: аналітична записка БАУ. 2013. № 6. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics
53. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні: аналітична записка БАУ. 2014. № 7. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics
54. Перспективи вирощування та використання енергетичних культур в Україні: аналітична записка БАУ. 2014. № 10. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics
55. Аналіз додаткових джерел деревного палива в Україні: аналітична записка БАУ. 2016. № 15. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics

56. Новітні технології біоенергоконверсії : монографія / Я. Б. Блюм, Г. Г. Плетуха, І. П. Григорюк, В. О. Дубровін, А. І. Ємець, Г. М. Забарний та ін. К. : Аграр Медіа Груп, 2010. 326 с.
57. Швед О. М., Пацула В. Р., Сидоров Ю. І., Новіков В. П. Аналітичний огляд проблеми біопалива в Україні. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні*: матеріали 5-тої Міжнародної науково-практичної конференції. Львів : ЛьВЦНТЕІ, 2009. С. 163–167.
58. Терлецький-Запєвич Й. Генерування електроенергії з біомаси. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні*: матеріали 5-тої Міжнародної науково-практичної конференції. Львів : ЛьВЦНТЕІ, 2009. С. 157–158.
59. Adrian J., Thring R., Helle S., Ghuman H.. (2012). Ash Management Review—Applications of Biomass Bottom Ash. *Energies*. 5. 10.3390/en5103856.
60. Белосельский Б. С., Соляков В. К. Энергетическое топливо : учеб. пособие для теплоэнерг. спец. Вузов. М. : Энергия, 1980. 166 с.
61. Gołuchowska B., Sławiński J., Markowski G. Biomass utilization as a renewable energy source in polish power industry – current status and perspectives. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 16. Is. 3. July 2015 P. 143–154. DOI: 10.12911/22998993/2948.
62. Stampfer K. (Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien), Verfahren und Kosten für die Energieholzerzeugung in der Durchforstung in Abhängigkeit von den Geländeverhältnissen. In: Tagungsunterlagen Fachtagung «Kosten der Energieholzbereitstellung – Kurzumtrieb und Durchforstung», Wieselburg, November 2005. URL: www.klimaaktiv.at/filemanager/download/13624/
63. Мадоян А. А. и др. Эффективное сжигание низкосортных углей в энергетических котлах. М. : Энергоатомиздат, 1991. 200 с.
64. Бидасюк Ю.М. Mathsoft MathCAD. Самоучитель. М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. 224 с.

65. ГОСТ 13301-67. Органические химические продукты. Микрометод определения содержания азота (с Изменением № 1). М. : ИПК Издательство стандартов, 1999.
66. Демидов П. Г., Шандыба В. А., Щеглов П. П. Горение и свойства горючих веществ. М. : Химия, 1981. 311 с.
67. Ферапонтов Ю. А., Путин С. Б., Ферапонтова Л. Л., Путин П. Ю. Изучение кинетики топохимических процессов в неизотермическом режиме дериватографическим методом. *Вестник ТГТУ*. 2009. Т. 15. № 4. С. 826–834.
68. Satava V. Mechanism and Kinetics from Non – isothermal TG Traces. *Thermochim. Acta*. 1971. V. 2. P. 423–428.
69. Dickens B., Flynn J. H. Thermogravimetry Applied to Polymer degradation kinetics // *Polymer Characterization, Spectroscopy, Chromatography and Physical Instrumental methods*. – *Nath. Symp.* 3 April 1981. Washington DC 1983. P. 209–232.
70. Білей П. В., Павлюст В. М. Сушіння і захист деревини : підручник для студ. вищих навч. закл. / Національний лісотехнічний ун-т України. Львів, 2008. 312 с.
71. Гупало О. П., Тушницький О. П. Хімія деревини : підручник / Національний лісотехнічний ун-т України. 2-ге вид., виправ. і доп. К. : Знання, 2008. 276 с.
72. ДСТУ EN 460:2003 Стійкість деревини та виробів з деревини. Природна стійкість суцільної деревини. К. : Держспоживстандарт України, 2004. (Національний стандарт України).
73. Козак Р. О., Козакєвіч П. А. Технологія деревинної маси : навч. посіб. / Український держ. лісотехнічний ун-т. К. : Основа, 2004. 348 с.
74. Комплексна хімічна переробка деревини / П. А. Бехта та ін. ; Український держ. лісотехнічний ун-т. К. : Основа, 2004 . — 176 с.
75. Шестак Я. Теория термического анализа: Физико-химические свойства твердых неорганических веществ. М. : Мир, 1987. 456 с.
76. Moreno J. L., Bastida F., Ondoño S., García C., Andrés-Abellán M., López-Serrano F.R. Agro-forestry management of Paulownia plantations and their impact on

- soil biological quality: The effects of fertilization and irrigation treatments. *Appl. Soil Ecol.* 2017, 117, S. 46–56.
77. Woods V. B. Paulownia as a Novel Biomass Crop for Northern Ireland? In *A Review of Current Knowledge*, 7th ed.; Agri-Food and Biosciences Institute: Belfast, Northern Ireland, 2008. URL: https://www.doc-developpement-durable.org/file/Arbres-Bois-de-RapportReforestation/FICHES_ARBRES/Paulownia/Paulownia%20as%20a%20novel%20biomass%20crop_Ireland.pdf
78. Huseinovic S. Paulownia elongata sy hu in function of improving the quality of the environment. *Period. Eng. Nat. Sci. (PEN)*, 2017, 5, S. 117–123.
79. Bortniak M., Sekutowski T. R., Zajączkowska O., Kucharski M. Influence of the soil from Oxytree [Paulownia elongata S. Y. Hu × Paulownia fortunei (Seem.) Hemsl.] plantation on germination and initial growth of winter wheat and winter rape. *Prog. Plant Prot.* 2018, 58, S. 247–250.
80. Paulownia112.com. URL: <https://www.paulownia112.com/wp-content/uploads/2015/10/informe-de-resultados-ms344-analisis-biomasa-clon-in-vitro-112r.pdf>
81. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. М. : Изд-во МГУ, 1957. 442 с.
82. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М. : Наука, 1980. 478 с.
83. Lipskis A. L., Kvikli A. V., Lipskene A. M., Maciulis A. N.. The calculation kinetic parameters of thermal degradation of polymers. *Macromolecular compounds*. 1976. Vol (A) XVIII. S. 426–431.
84. Егунов В. П. Введение в термический анализ. Самара, 1992. 270 с.
85. Цапко Ю. В. Дослідження кінетичних параметрів при піролізі деревини вогнезахищеної просочувальними засобами. *Пожезна безпека*. 2011. № 19. С. 163–169.
86. Налимов В. В., Голикова Т. И. Логические основания планирования эксперимента. М. : Металлургия, 1976. 128 с.

87. Самарский А. А. Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. М. : Физматлит, 2001. 320 с.
88. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений. М. : Наука, 1976. 280 с.
89. Андреев С. Е., Зверевич В. В., Перов В. А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М. : Недра, 1980. 415 с.
90. Перов В. А., Андреев Е. Е., Биленко Л. Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М. : Недра, 1990. 301 с.
91. Виленский Т. В., Хзмалян Д. М. Динамика горения пылевидного топлива. М. : Энергия, 1977. 248 с.
92. Андреева В. В., Кадыкова Ю. А., Свешникова Е. С. Дифференциально термический анализ полимеров. Методические указания к учебно-исследовательской работе по курсу «Структура полимерных материалов» для студентов специальности 250600 «Технология переработки пластмасс и эластомеров». Саратов, 2006.
93. Абдурагимов И. М., Андросов А. С., Исаева Л. К., Крылов Е. В. Процессы горения. М. : ВИПТШ МВД СССР, 1984. 268 с.
94. Демидов П. Г., Саушев В. С. Горение и свойства горючих веществ. М. : Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1975. 272 с.
95. Лукутин Б. В., Суржикова О. А, Шандорова Е. Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении : монография. М. : Энергоатомиздат, 2008. 231 с.
96. Котельні: ДБН В.2.5-77: 2014. [Чинний від 2015-01-01]. К. : Мінрегіон України, 2014. 65 с. (Національний стандарт України).
97. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4 МВт: ГОСТ 30735-2001. [Введен с 2003.01.01]. Мн. : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. 30 с. (Межгосударственный стандарт).
98. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. СПб.: ВТИ, НПО ЦКТИ, 1998. 257 с.

99. Методика нормування витрат палива та теплової енергії на виробництво і транспортування теплової енергії для споживання системами опалення, вентиляції і гарячого водопостачання та господарсько-побутових потреб житлових будинків та громадських споруд в Україні : Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. К., 2011
100. Основы практической теории горения : уч. пособ. для вузов / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др.; под ред. В. В. Померанцева. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
101. Хзмалян Д. М. Теория топочных процесов : уч. Пособ. для вузов. М. : Энергоатомиздат, 1990. 332 с.
102. Тепловой расчет котлоагрегатов (нормативный метод) – СПб, НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
103. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж: ГКД 34.20.507-2003. Офіц. вид. К.: М-во палива та енергетики України, 2003. 597 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Правила).
104. ДСТУ 3581-97. Енергозбереження. Методи визначення теплоти згоряння палива. Загальні положення.
105. ДСТУ 3401-97. Енергозбереження. Методи та засоби вимірювання теплових величин. Загальні положення.
106. ГКД 34.09.103-96. Розрахунок звітних техніко-економічних показників електростанції про теплову економічність устаткування – Методичні вказівки. К.; УНВО «Енергопрогрес», 1996. 74 с. (Галузевий керівний документ).
107. ГКД 34.09.151-94. Перегляд (розробка) енергетичних характеристик обладнання, порядок визначення нормативних питомих витрат і економії палива на енергопідприємствах. Положення. К. : УНВО «Енергопрогрес», 1994. 70 с. (Галузевий керівний документ).
108. Елезаров П. П. Эксплуатация котельных установок высокого давления на электростанциях. М. : Государственное энергетическое издательство, 1961. 399 с.

109. Методика визначення нераціонального (неефективного) використання паливно-енергетичних ресурсів. [Чинний від 2006.12.22]. К. : ДП «Укренергоефективність», 2001. 141 с.
110. Ялечко В. І., Матіко Ф. Д. Котельня на основі удосконаленої паливної підвищеної ефективності. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів : НЛТУ, 2017. № 27.6. С. 131–134.
111. Ялечко В. І., Гнатишин Я. М. Камерна паливня для спалювання деревної біомаси. Патент України на корисну модель №93790. МПК F27B 3/04 (2006.01). 10.10.2014. Бюлетень № 19. 2014.
112. Трёмбовля В. И и др. Теплотехнические испытания котельных установок. М. : Энергия, 1977.
113. Пеккер Я. Л. Теплотехнические расчеты по приведенным характеристикам топлива. М. : Энергия, 1977.
114. Двойнишников В. А., Деев Л. В., Изюмов М.А. Конструкция и расчет котлов и котельных установок : Учебник для техникумов по специальности «Котлостроение». М. : Машиностроение, 1999. 264 с.
115. Справочник потребителя биотоплива / В. Варес, Ю. Касък, П. Муйсте, Т. Пиху, С. Соосаар ; под. ред. В. Вареса. Таллиннский технический университет. Таллинн, 2005. 184 с.

ДОДАТКИ

Дослідження математичної моделі процесу самозаймання за допомогою
ППП Mathcad

Визначення безрозмірної температури суміші:

Вихідні дані для розрахунку:

$$E := 33000 \text{ Дж/моль}$$

$$R := 8.314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

$$i := 5, 10.. 50$$

$$T(i) := i + 273 \text{ К}$$

$$\Theta(T) := \frac{R \cdot T}{E}$$

$$\text{ORIGIN} := 1$$

Початкова безрозмірна температура

$$\Theta(T(i)) =$$

	1
1	0.0455
2	0.0489
3	0.0512
4	0.0535
5	0.0598
6	0.0627
7	0.0686
8	0.0704
9	0.0715
10	0.0738

$$\text{ORIGIN} := 0$$

Процес самозапалювання без врахування тепловідведення (адіабатні умови)

Given

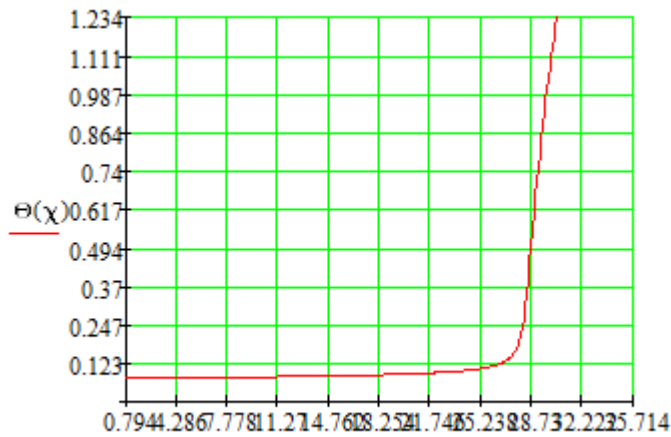
$$\frac{1}{\Theta(\chi)^2} \cdot e^{\frac{-1}{\Theta(\chi)}} - \frac{d}{d\chi} \Theta(\chi) = 0$$

$$\Theta(0) = 0.0455$$

$$\Theta := \text{Odesolve}(\chi, 40)$$

$$\Theta(12.25) = 0.0598$$

$$\chi := 0, 0.1.. 40$$



Залежність безрозмірної температури Θ від безрозмірної координати χ

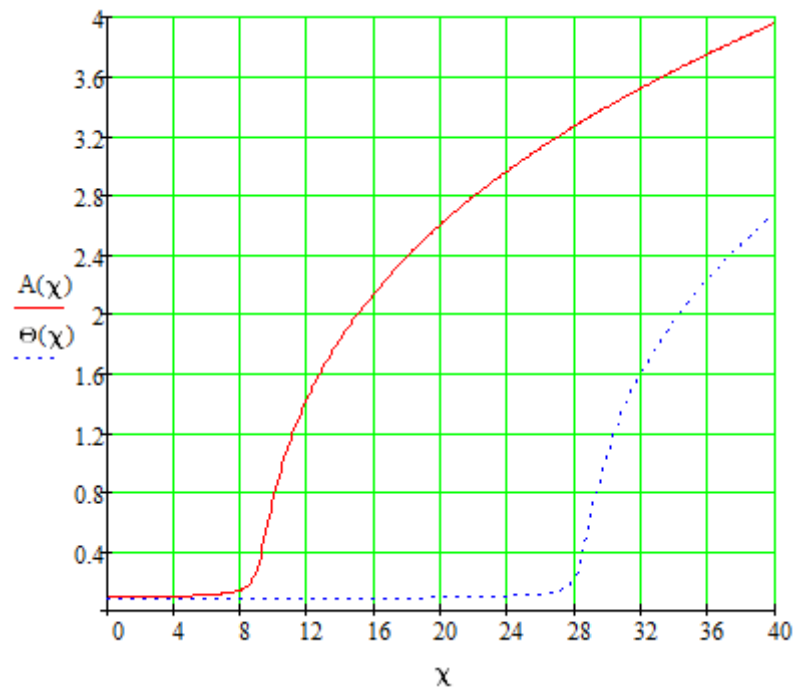
Given

$$\frac{1}{\Theta(\chi)^2} \cdot e^{-\Theta(\chi)} - \frac{d}{d\chi} \Theta(\chi) = 0$$

$$\Theta(0) = 0.0738$$

$$\underline{A} := \text{Odesolve}(\chi, 40)$$

$$\chi := 0, 0.1.. 40$$



Залежність безрозмірної температури Θ та концентрації A від безрозмірної координати χ

Процес самоzapалювання із урахуванням тепловіддачі

$$\underline{\Omega} := \left(\frac{4 \cdot 1 \cdot 30600^3}{273^2 \cdot 0.1737 \cdot 1.66 \cdot \frac{1}{5.757} \cdot 238 \cdot 21998 \cdot 8.314^3 \cdot 0.4} \right) \div 1000$$

$$\Omega = 0.02551$$

pru $\alpha=1$

$$\underline{T} := 0.0455$$

Given

$$\frac{1}{\Theta(\chi)^2} \cdot e^{\frac{-1}{\Theta(\chi)}} - \frac{d}{d\chi} \Theta(\chi) - \Omega \cdot (\Theta(\chi) - T) = 0$$

$$\Theta(0) = 0.0455$$

$\Theta := \text{Odesolve}(\chi, 40)$

$\chi := 0, 0.1.. 40$

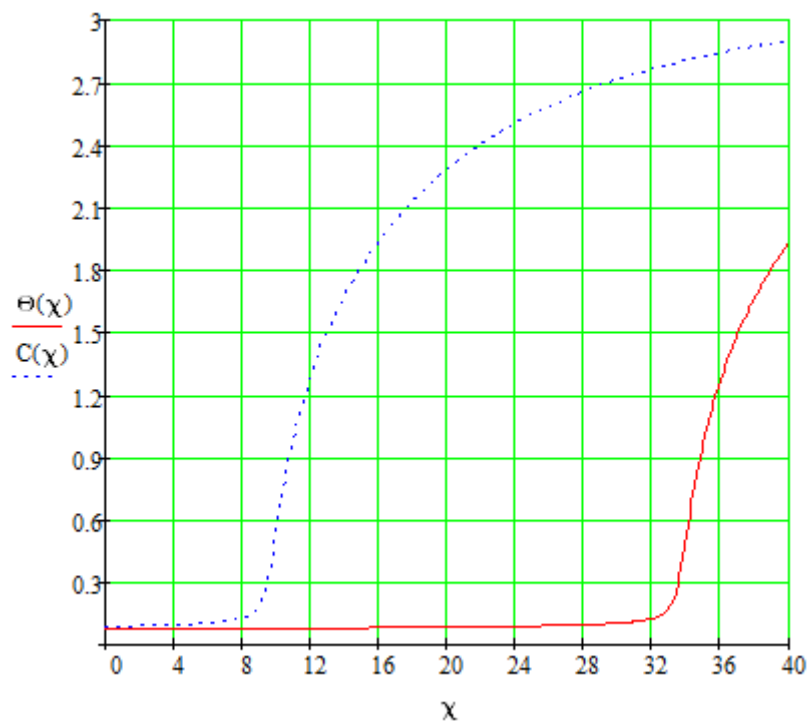
$T := 0.0738$

Given

$$\frac{1}{\Theta(\chi)^2} \cdot e^{\frac{-1}{\Theta(\chi)}} - \frac{d}{d\chi} \Theta(\chi) - \Omega \cdot (\Theta(\chi) - T) = 0$$

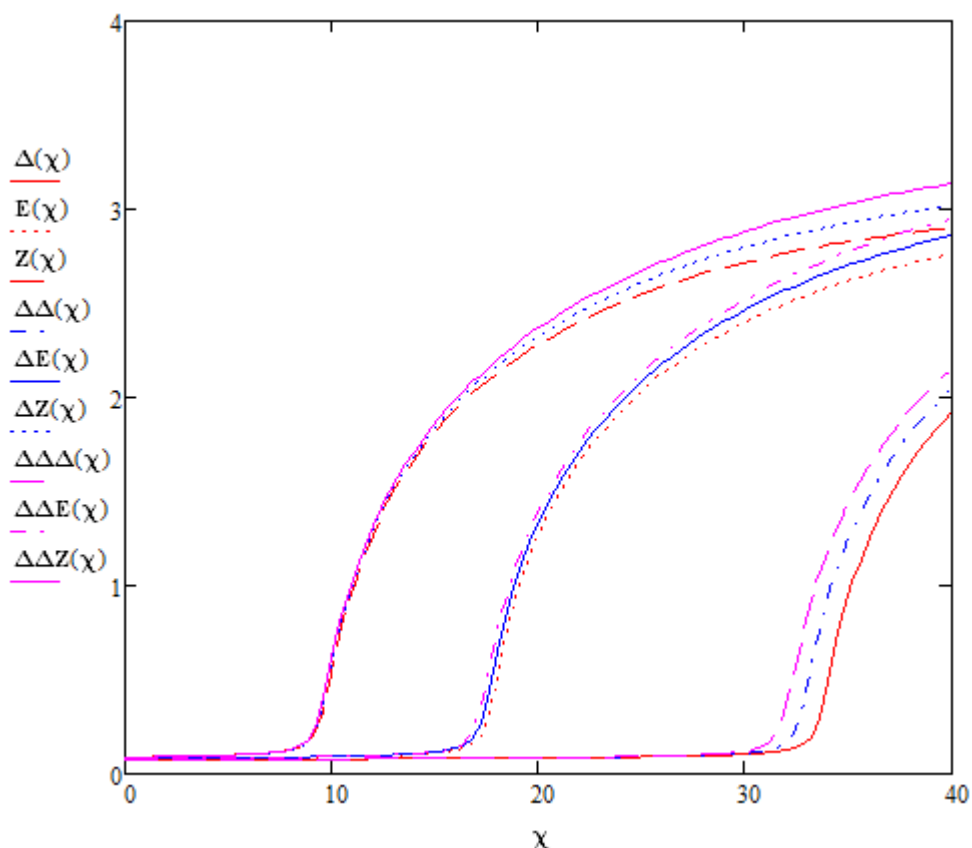
$$\Theta(0) = 0.0738$$

$C := \text{Odesolve}(\chi, 40)$

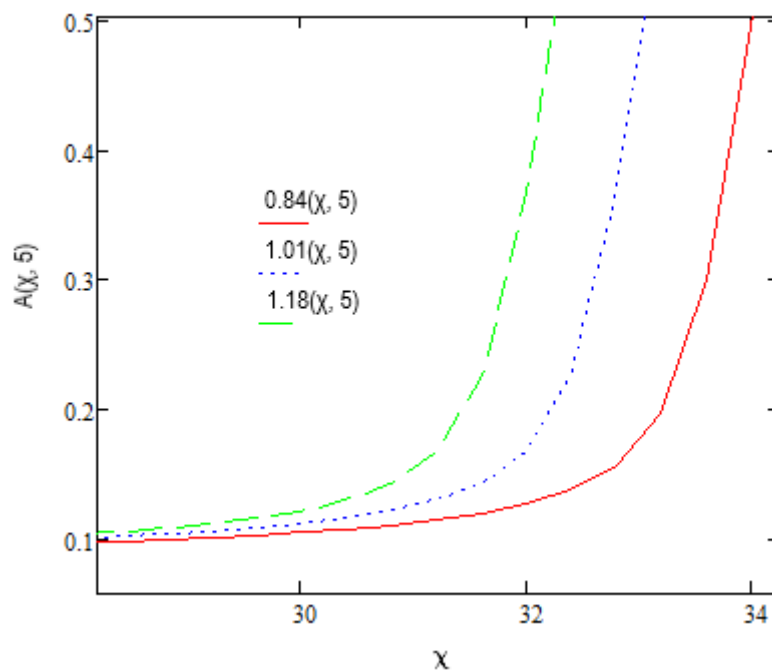


Залежність безрозмірної температури Θ та концентрації C від безрозмірної координати χ

Розв'язок нестационарної задачі самозаймання для паливної суміші здрібненої деревини:



Зростання безрозмірної температури реагуючої суміші з урахуванням температури навколишнього середовища (5, 25, 50 °С) та зольності верби Salix ($A^p=0.84\div 1.18\%$) по безрозмірній довжині камери згорання χ



Зростання безрозмірної температури реагуючої суміші при температурі навколишнього середовища 5°С та зольності верби Salix ($A^p=0.84\div 1.18\%$) по безрозмірній довжині камери згорання χ

Формули розрахунку параметрів режиму роботи котла

Абсолютний тиск вимірюваного середовища $P_{абс.}$, бар :

$$P_{абс.} = P + P_б, \quad (1)$$

де P – надлишковий тиск вимірюваного середовища, бар; $P_б$ – барометричний тиск, бар;

$$P_б = 1,3595 * 10^{-3} P_{бар}, \quad (2)$$

де $P_{бар}$ – барометричний тиск, мм рт. Ст..

Дійсні витрати середовищ:

Витрата перегрітої пари за котлом $D_{пе}$, т/год:

$$D_{пе} = D_{пе}^{ВИМ} * \sqrt{\frac{\vartheta_{пе}^p}{\vartheta_{пе}}}, \quad (3)$$

де $D_{пе}^{ВИМ}$ – витрата перегрітої пари, виміряна приладом, т/год;

$\vartheta_{пе}^p$, $\vartheta_{пе}$ – питомий об'єм перегрітої пари відповідно при розрахункових і дійсних параметрах пари на вимірювальній діафрагмі, м³ / кг. Розрахункові параметри: $P_{пе}^p = 62,5$ бар, $t_{пе}^p = 485$ °С, $\vartheta_{пе}^p = 0,053$ м³/кг ($\rho_{пе}^p = 18,868$ кг/м³).

Витрата живильної води $D_{жв}$, т/год:

$$D_{жв} = D_{жв}^{ВИМ} * \sqrt{\frac{\vartheta_{жв}^p}{\vartheta_{жв}}}, \quad (4)$$

де $D_{жв}^{ВИМ}$ – витрата живильної води, виміряна приладом, т/год;

$\vartheta_{жв}^p$, $\vartheta_{жв}$ – питомий об'єм води на вимірювальній діафрагмі при розрахункових і дійсних параметрах води відповідно, м³ / кг. Розрахункові параметри: $P_{жв}^p = 75$ бар, $t_{жв}^p = 136$ °С, $\vartheta_{жв}^p = 0,001071$ м³/кг ($\rho_{жв}^p = 933,7068$ кг/м³).

Виробітки котлом тепла бруто $Q_k^{бp}$, ккал/год:

$$Q_k^{бp} = (D_{пе} * (i_{пе} - i_{жв}) + D_{нп} (i_{кв} - i_{жв})), \quad (5)$$

де $D_{пе}$ – паропродуктивність котла, кг/год; $i_{пе}$ – ентальпія перегрітої пари, ккал/кг; $i_{жв}$ – ентальпія живильної води, ккал/кг; $D_{нп}$ – витрата безперервної продувки, кг/год; $i_{кв}$ – ентальпія котлової води, ккал/кг;

Втрати тепла з відхідними газами q_2 , % :

$$q_2 = (K * \alpha_{\text{відх}} + C) \left(\vartheta_{\text{відх}} - \frac{\alpha_{\text{відх}}}{\alpha_{\text{відх}} + \nu} t_{\text{дв}} \right) A_t * K_Q (1 - 0.01 * q_4) * 10^{-2}, \quad (6)$$

де K , C , ν – коефіцієнти, які залежать від виду і приведеної вологості палива; $\alpha_{\text{відх}}$ – коефіцієнт надлишку повітря у відхідних газах; $\vartheta_{\text{відх}}$ – температура відхідних газів, °C; $t_{\text{дв}}$ – температура повітря на вході у систему (перед ДВ), °C; A_t – коефіцієнт, що враховує вплив температури відхідних газів на теплоємність продуктів згорання; K_Q – коефіцієнт, що враховує додаткове тепло, внесене в паливню; q_4 – втрати тепла від механічного недопалу, %.

Для деревної тріски:

$$K = 3,33 + 0,02 * W^{\text{п}} \quad , \quad (7)$$

де $W^{\text{п}}$ – приведена вологість, у % , розраховується за формулою:

$$W^{\text{п}} = \frac{W^{\text{р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \quad (8)$$

$W^{\text{р}}$ – вологість палива робоча, у %;

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – теплота згорання робочої маси палива, ккал/кг;

$$C = 0,8 + 0,044W^{\text{п}} \quad (9)$$

$$\nu = 0,25 + 0,01W^{\text{п}} \quad (10)$$

Для суміші деревної тріски і енергетичної верби усереднений коефіцієнт $K_{\text{см}}$ визначається за формулою:

$$K_{\text{см}} = q_I K_I + q_{II} K_{II}, \quad (11)$$

де K_I , K_{II} – розрахункові коефіцієнти для кожного з палив; q_I , q_{II} – частки обох палив по теплу.

Усереднені коефіцієнти $C_{\text{см}}$ і $\nu_{\text{см}}$ для суміші палив визначаються аналогічно $K_{\text{см}}$.

Температура повітря на вході в систему (перед ДВ) $t_{\text{дв}}$, °C :

$$t_{\text{дв}} = 25 \text{ °C.}$$

Температура відхідних газів $\vartheta_{\text{відх}}$, °C :

$$\vartheta_{\text{відх}} = \vartheta'_{\text{ек}},$$

де $\vartheta'_{\text{ек}}$ – температура димових газів за економайзером, °C.

Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_{\text{відх}}$ у відхідних газах за наявності хімічної

неповноти згорання:

$$\alpha_{\text{вiдх}} = \frac{21 - 0,02 * O_2}{21 - (O_2 - 0,5 * CO)}, \quad (12)$$

де O_2 – об'ємний вміст кисню у відхідних газах, %; CO – об'ємний вміст оксиду вуглецю, %.

Коефіцієнт A_t , який враховує вплив температури відхідних газів на теплоємність продуктів згорання:

$$A_t = 1 + 0,013 \frac{\vartheta_{\text{вiдх}} - 150}{100} \quad (13)$$

Коефіцієнт K_Q , який враховує додаткове тепло, внесене в паливню:

$$K_Q = \frac{1}{1 + \frac{Q_{\text{вн}}}{Q_p^H}}, \quad (14)$$

де $Q_{\text{вн}}$ – питома витрата додаткового тепла, внесеного в паливню, ккал/кг; Q_p^H – теплота згорання робочої маси палива, ккал/кг.

Втрати тепла з хімічним недопалюванням q_3 , %:

$$q_3 = 3,32 * CO(\alpha_{\text{вiдх}} - 0,02) * (1 + 0,006 * W^H)(1 - 0,01 * q_4). \quad (15)$$

Втрати тепла від механічного недопалу q_4 , %:

$$q_4 = \alpha_{\text{шл}} * \frac{\Gamma_{\text{шл}} * A^P}{100 - \Gamma_{\text{шл}}} * \frac{7800}{Q_p^H} + \alpha_{\text{вин}} * \frac{\Gamma_{\text{вин}} * A^P}{100 - \Gamma_{\text{вин}}} * \frac{7800}{Q_p^H}, \quad (16)$$

де $\alpha_{\text{шл}}$, $\alpha_{\text{вин}}$ – частка золи палива, що виноситься з паливни зі шлаком і золюю виносу відповідно ($\alpha_{\text{шл}} = 0,85$, $\alpha_{\text{вин}} = 0,15$); $\Gamma_{\text{шл}}$, $\Gamma_{\text{вин}}$ – вміст горючих у шлаці і золі виносу відповідно, %; A^P – зольність палива, %.

Втрати тепла в навколишнє середовище q_5 , % :

$$q_5 = 1,15 \frac{D_{\text{ном}}}{D}, \quad (17)$$

де $D_{\text{ном}}$, D – номінальна паропродуктивність котла і поточна, відповідно, т/год.

$D_{\text{ном}} = 21,7$ т/год.

Втрата тепла з фізичним теплом шлаку q_6 , %:

$$q_6 = \frac{a_{\text{шл}} * (cv)_{\text{шл}} * A^P}{Q_p^H} \quad (18)$$

ККД котла бруто, % :

$$\eta_{\text{к}}^{\text{бр}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (19)$$

Витрата палива по зворотному балансу $V_{\text{п}}$, кг/год:

$$V_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{бр}}}{0,01 * Q_{\text{р}}^{\text{п}} * \eta_{\text{к}}^{\text{бр}}} \quad (20)$$

де $Q_{\text{к}}^{\text{бр}}$ – теплопродуктивність котла брутто, ккал/год; $Q_{\text{р}}^{\text{п}}$ – робоча теплота топлива, ккал/кг; $\eta_{\text{к}}^{\text{бр}}$ – ККД котла брутто, %.

Робоча теплота палива, ккал/кг:

$$Q_{\text{р}}^{\text{п}} = \frac{Q_{\text{р}}^{\text{н}}}{K_Q} \quad (21)$$

Витрата умовного палива $V_{\text{ум}}$, кг.у.п:

$$V_{\text{ум}} = V_{\text{т}} * \frac{Q_{\text{р}}^{\text{н}}}{7000}, \quad (22)$$

де 7000 – нижча теплота згорання умовного палива, ккал/кг.

ККД котла нетто, %:

$$\eta_{\text{к}}^{\text{н}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{бр}} - Q_{\text{к}}^{\text{ел}}}{V_{\text{т}} * Q_{\text{р}}^{\text{п}}}, \quad (23)$$

де $Q_{\text{к}}^{\text{ел}}$ – витрата тепла на електроенергію, витрачену на власні потреби котла, ккал/кг.

$$Q_{\text{к}}^{\text{ел}} = 860 * E_{\text{ВП}}^{\text{к}}, \quad (24)$$

де $E_{\text{ВП}}^{\text{к}}$ – витрата електроенергії на власні потреби, кВт*год.

Потужність, споживана електродвигунами механізмів власних потреб, N, кВт :

$$N = I * U * \sqrt{3} * \cos\varphi, \quad (25)$$

де I – струм вимірюваний на фазі, А; U – напруга, В; $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності (табличне значення).

Приведене значення ККД котла брутто, %:

$$\eta_{\text{к}}^{\text{бр п}} = \eta_{\text{к}}^{\text{бр о}} + \sum \Delta\eta_{\text{к}}^{\text{бр}^m}, \quad (26)$$

де $\eta_{\text{к}}^{\text{бр о}}$ – початкове для приведення значення ККД брутто котла, %;

$\Delta\eta_{\text{к}}^{\text{бр}^m}$ – зміна (поправка) ККД брутто котла внаслідок відхилення значення режимного параметра «m» від нормативного.

Поправка до ККД котла брутто $(\Delta\eta_{\text{к}}^{\text{бр}})^m$ (втраті тепла з димовими газами) на

відхилення значення режимного параметра « m » від нормативного, %:

$$(\Delta\eta_k^{\text{бр}})^m = K_{\eta_k^m}^{\text{бр}} * (m^\Phi - m^H), \quad (27)$$

де $K_{\eta_k^m}^{\text{бр}}$ – поправочний коефіцієнт до ККД брутто котла на зміну режимного параметра « m ».

Питома витрата електроенергії на привід механізмів власних потреб $E_{\text{вп}}$, кВт*год/Гкал:

$$E_{\text{вп}} = \frac{N}{Q_k^{\text{бр}}} \quad (28)$$

Вміст оксидів азоту NO_x в димових газах, ppm:

$$\text{NO}_x = \text{NO} + q_{\text{NO}_2} * \text{NO}, \quad (29)$$

де NO – вміст оксиду азоту в димових газах, ppm;

q_{NO_2} – стандартна частка діоксиду азоту в оксидах азоту, $q_{\text{NO}_2} = 0,05$.

Концентрація оксидів азоту в димових газах, приведена до $\alpha=1,4$, мг/м³:

$$(\text{NO}_x^{\text{відх}})_{\text{пр}} = 2,05 * \text{NO}_x * \frac{\alpha_{\text{відх}}}{1,4} \quad (30)$$

Таблиця Д3.1

Результати дослідів по визначенню впливу коефіцієнту надлишку повітря на економічні та екологічні характеристики роботи експериментального зразка котла при спалюванні деревної тріски

Назва параметру, одиниці вимірювання	Значення									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Навантаження 50% номінального			Навантаження 75% номінального			Навантаження 100% номінального			
Вода і пара										
Витрата живильної води перед котлом, кг/с	2,70	2,96	2,61	4,65	4,46	4,48	5,86	5,92	5,93	
Витрата живильної води перед котлом, т/год	9,71	10,66	9,40	16,75	16,05	16,12	21,11	21,30	21,36	
Температура живильної води перед котлом, °С	119,9	119,9	119,9	121,6	121,6	121,6	111,2	110,5	110,9	
Температура живильної води після ЕК, °С	213,1	213,6	207,4	225,3	221,8	229,3	249,9	245,7	243,1	
Тиск в барабані, бар	62,3	62,4	62,4	63,2	63,2	63,2	64,1	64,1	64,1	
Тиск перегрітої пари, бар	61,4	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	61,4	61,4	61,4	
Температура перегрітої пари, °С	450,1	459,6	448,1	484,6	485,0	484,6	484,8	484,8	484,5	
Паропродуктивність приведена, т/год	9,80	10,56	9,53	16,52	15,79	15,96	21,06	21,22	21,32	
Теплопродуктивність приведена, Гкал/год	6,56	7,12	6,37	11,34	10,84	10,95	14,66	14,79	14,85	
Теплопродуктивність приведена, Q _N , МВт	7,63	8,28	7,41	13,19	12,61	12,73	17,05	17,20	17,27	
Паливо										

Технічний аналіз палива											
Нижча робоча теплота згорання, Q^p_n , кДж/кг	8740	8740	8740		8740	8740	8740		8630	8630	8630
Вологість робоча, W^p , %	47,8	47,8	47,8		47,8	47,8	47,8		48,0	48,0	48,0
Зольність робоча A^p , %	0,4	0,4	0,4		0,4	0,4	0,4		1,3	1,3	1,3
Вміст сірки на робочу масу, S^p , %	0,038	0,038	0,038		0,038	0,038	0,038		0,041	0,041	0,041
Вміст горючих в мокрому шлаку, $C_{шл}$, %	0,67	0,55	0,49		1,98	0,25	0,91		0,94	0,94	0,94
Вміст горючих у виносі, $C_{вин}$, %	1,48	1,31	2,07		0,10	0,16	0,38		0,07	0,49	1,44
Повітря											
Витрата первинного повітря, m^3/c	0,90	0,82	0,93		1,17	1,17	1,36		2,11	2,26	2,27
Витрата вторинного повітря, m^3/c	1,13	1,16	1,11		1,38	1,20	1,20		1,32	1,32	1,32
Витрата третинного повітря, m^3/c	0,99	1,45	0,62		2,22	1,99	2,29		2,77	2,03	1,75

Продовження таблиці ДЗ.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Продукти горіння											
Вміст O_2 , % (середнє)	6,45	5,45	5,15		4,45	4,00	5,10		5,60	4,50	3,70
Вміст CO, ppm	42	27	89		14	96	66		3	29	96
Вміст CO приведенне, mg/m^3	54	33	106		16	106	78		4	33	105
Вміст NO, ppm	62	64	60		108	73	66		86	79	70
Вміст NO_x , ppm	65	67	63		113	77	69		90	83	74
Концентрація NO_x приведена, mg/m^3	136	132	122		209	138	133		180	154	131
Коефіцієнт надлишку повітря,	1,43	1,34	1,32		1,26	1,23	1,31		1,36	1,27	1,21
Концентрація частинок, mg/m^3	1	0	1		1	1	1		1	1	1

Температура, °С:											
Паливні	566	561	541		599	592	618		629	618	616
Димових газів в паливні	621	647	583		735	713	702		742	706	726
Димових газів у поворотній камері	529	551	529		584	595	572		613	635	653
Димових газів після економайзера	135,1	135,1	133,2		142,5	140,9	143,9		149,6	147,6	145,6
Розрахунок втрат тепла											
Коефіцієнти											
К	3,439	3,439	3,439		3,439	3,439	3,439		3,441	3,441	3,441
С	1,808	1,808	1,808		1,808	1,808	1,808		1,825	1,825	1,825
b	0,479	0,479	0,479		0,479	0,479	0,479		0,483	0,483	0,483
A _t	0,9981	0,9981	0,9978		0,9990	0,9988	0,9992		0,9999	0,9997	0,9994
Втрати тепла з відхідними газами, q ₂ , %	7,80 9	7,469	7,277		7,627	7,411	7,923		8,527	8,013	7,639
Втрати тепла з хімічним недопалюванням, q ₃ , %	0,020	0,012	0,040		0,006	0,040	0,029		0,001	0,012	0,039
Втрати тепла в навколишнє середовище q ₅ , %	2,546	2,364	2,617		1,510	1,580	1,564		1,185	1,176	1,171
Втрати тепла з механічним недопалюванням, q ₄ , %	0,01 0	0,009	0,010		0,023	0,003	0,011		0,041	0,045	0,052
Втрати тепла з фізичним теплом шлаку, q ₆ , %	0,016	0,016	0,016		0,016	0,016	0,016		0,061	0,061	0,061
ККД котла бруто, %	89,60	90,13	90,04		90,82	90,95	90,46		90,18	90,69	91,04

Таблиця Д3.2

Результати дослідів по визначенню впливу коефіцієнта надлишку повітря на економічні та екологічні характеристики роботи експериментального зразка котла при спалюванні суміші деревної тріски та енергетичної верби в співвідношенні 70/30% відповідно

Назва параметру, одиниці вимірювання	Значення											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1												
	Навантаження 50% номінального					Навантаження 75% номінального			Навантаження 100% номінального			
Вода і пара												
Витрата живильної води перед котлом, кг/с	2,75	2,76	2,81	2,60	2,82	4,36	4,29	4,46	5,96	5,98	6,10	
Витрата живильної води перед котлом, т/год	9,91	9,93	10,12	9,37	10,14	15,70	15,46	16,06	21,46	21,54	21,96	
Температура живильної води перед котлом, °С	109,1	108,9	109,0	109,1	108,5	120,5	120,7	120,3	119,9	119,1	119,7	
Температура живильної води після ЕК, °С	223,1	224,4	227,5	227,0	221,4	229,0	222,2	219,6	244,2	237,5	232,2	
Тиск в барабані, бар	62,4	62,4	62,5	62,0	62,4	63,2	63,0	63,1	64,2	64,2	64,3	
Тиск перегрітої пари, бар	61,5	61,5	61,5	61,1	61,4	61,4	61,5	61,5	61,4	61,5	61,5	
Температура перегрітої пари, °С	455,5	452,1	454,0	447,3	456,2	484,7	484,8	484,8	485,0	485,5	485,3	
Паропродуктивність приведена, т/год	10,01	10,11	10,21	9,47	10,08	15,57	15,33	16,34	21,42	21,50	21,78	
Теплопродуктивність приведена, Гкал/год	6,83	6,88	6,96	6,42	6,89	10,70	10,53	11,23	14,73	14,81	14,99	
Теплопродуктивність приведена, Q _N , МВт	7,94	8,00	8,09	7,47	8,01	12,44	12,25	13,06	17,13	17,22	17,43	
Паливо												
Технічний аналіз палива												

Нижча робоча теплота згорання, Q^p_n , кДж/кг	8348	8348	8348	8348	8348		7844	7844	7844		7844	7844	7844
Вологість робоча, W^p , %	45,1	45,1	45,1	45,1	45,1		47,5	47,5	47,5		47,5	47,5	47,5
Зольність робоча A^p , %	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0		6,5	6,5	6,5		6,5	6,5	6,5
Вміст сірки на робочу масу, S^p , %	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082		0,156	0,156	0,156		0,156	0,156	0,156
Вміст горючих в мокрому шлаку, $C_{шл}$, %	4,78	4,78	4,78	4,78	4,78		1,49	1,80	1,56		2,13	1,02	1,01
Вміст горючих у виносі, $C_{вин}$, %	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30		0,18	0,60	0,26		0,16	0,11	0,00
Повітря													
Витрата первинного повітря, м ³ /с	0,80	0,87	0,78	0,87	0,84		1,10	1,16	1,55		2,00	1,82	1,87
Витрата вторинного повітря, м ³ /с	1,04	1,04	1,05	1,04	1,04		1,63	1,20	1,16		1,27	1,30	1,26
Витрата третинного повітря, м ³ /с	0,94	0,87	1,40	0,98	0,92		2,33	2,06	1,21		3,11	2,98	2,34

Продовження таблиці ДЗ.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Продукти горіння											
Вміст O ₂ , % (середнє)	3,55	4,03	5,18	5,75	2,85	5,00	4,85	3,45	5,65	5,45	3,20
Вміст CO, ppm	150	23	44	12	250	3	3	80	0	2	260
Вміст CO приведене, мг/м ³	162	25	52	15	259	4	3	86	0	2	276
Вміст NO, ppm	50	75	74	89	42	92	81	84	171	164	117
Вміст NO _x , ppm	53	79	78	93	44	97	85	88	180	172	123
Концентрація NO _x приведена, мг/м ³	93	141	150	188	74	195	160	154	357	338	212
Коефіцієнт надлишку повітря, A	1,20	1,23	1,32	1,37	1,15	1,38	1,29	1,19	1,36	1,34	1,18
Концентрація частинок, мг/м ³	1	2	2	1	1	1	1	1	3	2	2

Температура, °С:													
Паливні	531	546	554	531	558		682	643	654		664	656	645
Димових газів в паливні	635	614	644	600	648		766	725	695		764	750	724
Димових газів у поворотній камері	562	541	550	533	557		559	572	608		607	614	622
Димових газів після економайзера	132,6	133,0	135,3	135,0	131,3		141,8	138,8	137,7		150,2	147,1	145,0
Розрахунок втрат тепла													
Коефіцієнти													
К	3,621	3,621	3,621	3,621	3,621		3,652	3,652	3,652		3,652	3,652	3,652
С	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779		1,900	1,900	1,900		1,900	1,900	1,900
b	0,476	0,476	0,476	0,476	0,476		0,504	0,504	0,504		0,504	0,504	0,504
A _t	0,9977	0,9978	0,9981	0,9981	0,9976		0,9989	0,9985	0,9984		1,0000	0,9996	0,9994
Втрати тепла з відхідними газами, q ₂ , %	6,917	7,061	7,555	7,735	6,653		8,528	7,936	7,465		9,015	8,736	7,891
Втрати тепла з хімічним недопалюванням, q ₃ , %	0,060	0,009	0,019	0,005	0,096		0,001	0,001	0,032		0,000	0,001	0,104
Втрати тепла в навколишнє середовище q ₅ , %	2,494	2,469	2,444	2,634	2,477		1,603	1,628	1,527		1,165	1,161	1,146
Втрати тепла з механічним недопалюванням, q ₄ , %	1,267	1,267	1,267	1,267	1,267		0,356	0,447	0,376		0,508	0,242	0,235
Втрати тепла з фізичним теплом шлаку, q ₆ , %	0,327	0,327	0,327	0,327	0,327		0,323	0,323	0,323		0,323	0,323	0,323
ККД котла бруто, %	88,94	88,87	88,39	88,03	89,18		89,19	89,66	90,28		88,99	89,54	90,30

ДОДАТОК 4

Таблиця Д4.1

Результати комплексного термогравіметричного та диференційного термогравіметричного аналізів взірців деревини осики

Зразок	Стадія	Температурний інтервал, °С	Втрата маси, %
взірець 1 (кора+стовбутова деревина осики)	1	20–170	9,87
	2	170–270	14,33
	3	270–415	52,26
	4	415–513	23,54
взірець 2 (стовбутова деревина осики)	1	20–170	8,15
	2	170–275	17,06
	3	275–420	49,27
	4	420–530	25,52
взірець 3 (кора осики)	1	20–170	9,87
	2	170–270	14,33
	3	270–415	52,26
	4	415–500	23,54

Таблиця Д4.2

Результати комплексного термогравіметричного та диференційного термогравіметричного аналізів взірців деревини тополі

Зразок	Стадія	Температурний інтервал, °С	Втрата маси, %
взірець 1 (кора+стовбутова деревина тополі)	1	24 – 183	6,6
	2	183 – 274	20,5
	3	274 – 372	42,2
	4	372 – 571	29,6
взірець 2 (стовбутова деревина тополі)	1	24 – 183	9,0
	2	183 – 274	17,7
	3	274 – 373	40,9
	4	373 – 567	30,1
взірець 3 (кора тополі)	1	24 – 184	11,4
	2	184 – 278	20,0
	3	278 – 386	36,2
	4	386 – 626	32,4

Таблиця Д4.3

Результати комплексного термогравіметричного та диференційного термогравіметричного аналізів взірців деревини вільхи

Зразок	Стадія	Температурний інтервал, °С	Втрата маси, %
взірець 1 (кора+стовбутова деревина вільхи)	1	23 – 176	8,1
	2	176 – 288	16,4
	3	288 – 412	53,4
	4	412 – 570	22,1
взірець 2 (стовбутова деревина вільхи)	1	23 – 176	11,4
	2	176 – 291	16,7
	3	291 – 390	48,6
	4	390 – 543	25,8
взірець 3 (кора вільхи)	1	23 – 176	12,1
	2	176 – 270	22,7
	3	270 – 398	40,2
	4	398 – 609	25

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи ПАТ «ДМЗ»

Публічне акціонерне товариство
«ДМЗ»

АКТ

« » липня 2015 р.
м. Дрогобич, Львівська обл.



Про впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи Ялечка В. І. щодо переводу дахової міні-котельні на спалювання відходів деревини.

Підстава: Розпорядження директора Ільницького В. О..

Складений комісією у складі:

Голова комісії	Головний енергетик	Владика О.В.
Члени комісії:	інженер-теплоенергетик.....	Федорчук А.А.
	оператор міні-котельні.....	
Присутні:	науковий керівник кандидатської дисертації канд. техн. наук, доц. каф. АКТ НЛТУ України	Гнатишин Я.М.
	канд. техн. наук, проф. каф. ТМВД НЛТУ України	Войтович І.Г.
	асп. каф. АКТ НЛТУ України	Ялечко В.І.

Комісія провела роботу з оцінювання фактичного впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи Ялечка В.І. щодо переводу міні-котельні на спалювання відходів деревини.

Оптимізація ефективності спалювання відходів деревини здійснено на основі завдання ПАТ «ДМЗ».

У результаті проведеної комісією перевірки встановлено, що запропонований варіант переводу міні-котельні з спалювання природного газу на запропонований спосіб спалювання відходів деревини забезпечує економічну ефективність та екологічність роботи котельних агрегатів міні-котельні, впроваджений у виробництво на ПАТ «ДМЗ» та відповідає завданню та вимогам замовника.

Запропонований варіант переведення міні-котельні з газу на відходи деревини дозволить зменшити фінансові витрати на оплату енергоносіїв на 40 % та підвищити екологічний стан довкілля.

Акт складено у трьох примірниках:

1-й примірник – ПАТ «ДМЗ»;

2-й примірник – Національному лісотехнічному університету України;

3-й примірник – асп. каф. АКТ НЛТУ України Ялечку В.І.;

Голова комісії

Владика О.В.

Члени комісії:

Федорчук А.А.

Присутні:

Гнатишин Я.М.

Войтович І.Г.

Ялечко В.І.

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи українсько-чеське СП
«Ройек-Львів»

Україно-чеське СП «Ройек-Львів»
ЗКПО 19372017
м.Львів

«Затверджую»
Директор
Пишника І.М.
Підпис _____
«____» _____ Р.



АКТ




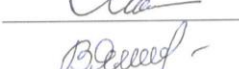
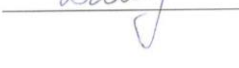
впровадження результатів дисертаційної роботи Ялечка В.І.
щодо удосконалення паливни для спалювання подрібненої деревини.

Підстава: Розпорядження директора Пишника І.М.
Складений комісією у складі:
Голова комісії технічний директор Маруняк М.С.
Члени : менеджер Дзюпин О.О.
начальник сервісної служби Філь М.М.
Присутні : професор кафедри АКІТ НУ «Львівська політехніка»,
д. т. н., професор Матіко Ф.Д.
асистент кафедри ТТАЕ НУ «Львівська політехніка»
Ялечко В.І.

Цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Ялечка В.І. «Підвищення ефективності енерготехнологічного процесу спалювання здрібною деревною біомаси», виконаної в Національному університеті «Львівська політехніка», а саме камерна паливня удосконаленої конструкції з обертовою колосниковою решіткою для спалювання здрібною деревною біомаси, застосовані під час розроблення експериментальної конструкції котельного агрегату. Використання запропонованої конструкції паливни дало можливість інтенсифікувати процес спалювання деревної біомаси та підвищити ефективність паливни, що в свою чергу дає можливість підвищити ефективність спалювання різних видів деревної біомаси а також деревних відходів. У кінцевому результаті застосування запропонованої конструкції паливни з обертовою колосниковою решіткою забезпечило підвищення коефіцієнта корисної дії експериментального зразка котельного агрегату на 1,4 %.

Акт складено у трьох примірниках:

- 1-й примірник – СП «Ройек-Львів»;
2-й примірник – Національному університету «Львівська політехніка»;
3-й примірник – асистенту кафедри ТТАЕ НУ «Львівська політехніка» Ялечку В.І.

Голова комісії		Маруняк М.С.
Члени комісії:		Дзюпин О.О.
		Філь М.М.
Присутні:		Матіко Ф.Д.
		Ялечко В.І.