

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

ЯЛЕЧКО ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ

УДК 62-664.2

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

Спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Матіко Федір Дмитрович,
професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-
інтегрованих технологій, декан магістратури інституту
енергетики та систем керування Національного
університету «Львівська політехніка».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Ганжа Антон Миколайович,
завідувач кафедри теплотехніки та енергоефективних
технологій Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»;

доктор технічних наук, доцент,
Чейлитко Андрій Олександрович,
завідувач кафедри теплоенергетики та гідроенергетики
Запорізького національного університету.

Захист відбудеться «13» травня 2021 р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д35.052.04 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, Львів, вул. Устияновича, 5, Х учбовий корпус, ауд. 51.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий « 09 » квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.04,
кандидат технічних наук, доцент



Вашкурак Ю. З.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Завдяки біомасі рослин незабаром може покриватися понад 10% усіх енерговитрат. Нині біомаса посідає четверте місце за значенням палива у світі, її споживання становить приблизно 14% загального споживання первинних енергоносіїв (у країнах, що розвиваються – понад 30%, в окремих країнах до 50–80%). В європейських державах частка біомаси у загальному споживанні первинних енергоносіїв становить відповідно: Фінляндія – 23%, Швеція – 18%, Австрія – 12%, Данія – 8%, Німеччина – 6%. Україна як європейська держава не може бути осторонь, зважаючи на те, що з-поміж європейських країн у нашої держави найбільший потенціал для розвитку альтернативних джерел енергії.

Серед наявних джерел біомаси найпридатнішими для використання як палива є деревна біомаса та відходи деревини. Важливу роль нині також відводять використанню як палива швидкоростучої деревини. Під час згорання деревини в котлах теплогенеруючих організацій, електростанцій у складі продуктів горіння в атмосферу викидається вуглекислий газ, однак немає таких шкідливих компонентів, як оксиди сірки. Вуглекислий газ поглинають рослини в період їхнього росту, тому вплив спалювання деревини на довкілля є значно меншим порівняно з впливом видобувних видів палива (нафти, вугілля). Отже, спалювання деревної біомаси в сучасних техногенних умовах є екологічно прийнятним методом отримання енергії.

Ефективне й 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.

Незважаючи на розвиток методів фізичного та комп'ютерного моделювання, не вдається отримати універсальні моделі, які коректно описують процеси горіння в паливневих камерах. Це пов'язано з великою різноманітністю видів деревної біомаси, схем підготовки та спалювання палива, конструкцій паливневих пристроїв. Тому залишається актуальним вдосконалення математичних моделей, які дають змогу точніше описати процес спалювання в паливневій камері. Наявність таких моделей дає можливість дослідити процес горіння, вдосконалити паливневі пристрої та підвищити ефективність технологічного процесу спалювання здрібненої біомаси, а отже й досягти вищої ефективності енергетичних установок, а також зменшити їх шкідливий вплив на довкілля.

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 непроектних 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).

Мета і задачі дослідження. 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.

Предметом дослідження є математичні моделі процесу горіння деревної біомаси та конструкції паливневих пристроїв котельних агрегатів.

Методи дослідження. Використано стандартизовані методи здійснення досліджень кінетичних характеристик деревної біомаси і 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 тому, що:

- 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;
- 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;
- 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 сформулювати вимоги до умов спалювання цієї породи деревини в паливневих пристроях;
- 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.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що:

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 паливневих 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 переведу 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.
6. Впроваджено вдосконалену конструкцію камерної паливни з обертовою колосниковою решіткою на Україно-чеському СП «Ройек-Львів». Використання запропонованої конструкції паливни у кінцевому результаті забезпечило підвищення ККД 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 й організаціями, які експлуатують котельні установки, що використовують як паливо здрібнену деревну біомасу.

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 [1–4] проведено експериментальні дослідження швидкоростучої деревини та групи порід деревини, які широко використовуються як паливо для спалювання в твердопаливних котлах, а також проведено математичне оброблення результатів досліджень; у роботах [5–7] розроблено конструкцію камерної паливни для спалювання здрібненої деревної біомаси та конструкцію вторинної камери допалювання; в роботі [8] здійснено аналіз можливості впровадження малих тепло- та електростанцій на місцевих видах палива і здійснено порівняння доцільності їх будівництва із великими ТЕС та ТЕЦ; в роботах [9–10, 13, 15] виконано математичне моделювання впливу властивостей здрібненої деревини та її відходів на процес спалювання; в роботах [11, 16, 18–21] запропоновано спосіб спалювання швидкоростучої і вживаної деревини, сформовані рекомендації щодо організації процесу спалювання, а також розроблено конструкцію паливневого пристрою для спалювання швидкоростучої деревини та деревних відходів; в роботах [12, 14] проаналізовано перспективи заміщення викопних видів палива деревною біомасою та проведено математичне моделювання процесу горіння швидкоростучої деревини та опрацювання результатів моделювання; в роботі [17] здійснено техніко-економічні розрахунки впровадження когенераційних установок, що використовують як паливо відходи деревини.

Апробація результатів дослідження. Дисертаційна робота обговорювалася на наукових семінарах кафедри теплоенергетики, теплових та атомних електричних станцій Національного університету «Львівська політехніка».

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 утилізуванню 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», 26–27 травня, 2016 р., Львів;
- 12-й Міжнародній конференції «Енергія з біомаси», 20–21 вересня, 2016 р., Київ;
- 9-й Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», 2017 р., Львів;

- 10-й Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», 4–5 квітня, 2019 р., Львів;
- Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології у розвитку сучасного суспільства», 18–19 квітня, 2019 р., Львів.

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 21 наукову працю, з них 3 – у фахових виданнях України, 1 – у закордонних виданнях (розділ у колективній монографії (США)), 2 – у патентах на корисні моделі, 15 – у збірниках доповідей міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано доцільність і актуальність проблеми, визначено мету роботи, наукову новизну та її практичну цінність.

У першому розділі виконано огляд літератури щодо сучасного стану досліджень процесу спалювання деревної біомаси. Розглянуто характеристики та потенціал відходів деревини з погляду ефективності її спалювання. Виконано аналіз наявних результатів досліджень теплоенергетичних і кінетичних характеристик видів деревної біомаси, які використовують в енерготехнологічних процесах. Проведено аналіз відомих способів спалювання деревної біомаси і показано, що найбільш перспективним для виробництва електричної та теплової енергії є спосіб спалювання в камерних паливнях. Розглянуто різні конструкції паливень. Зібрано та проаналізовано дані про паливневі пристрої, які виготовляють вітчизняні виробники котельного обладнання для спалювання різноманітних місцевих видів палива та відходів деревини. Показано, що для підвищення ефективності процесу спалювання здрібненої деревної біомаси необхідно вдосконалити відомі конструкції паливневих пристроїв.

На основі виконаних в першому розділі досліджень сформульовано мету й завдання досліджень у дисертаційній роботі.

У другому розділі подано результати аналізу відомих математичних моделей процесу спалювання деревної біомаси, а також удосконалену математичну модель цього процесу.

За результатами аналізу встановлено, що математична модель процесу спалювання здрібненої деревної біомаси може бути розроблена на основі рівняння нестационарного процесу самоzapалювання деревної біомаси, розробленого професором Д. М. Хзмаляном на основі теоретичних положень хімічної кінетики перебігу процесу самоzapалювання академіка Н. Н. Семенова

Для розроблення математичної моделі процесу спалювання здрібненої деревної біомаси застосовано рівняння теплового балансу реагуючої суміші професора Д. М. Хзмаляна у безрозмірному вигляді, яке доповнене диференціальним рівнянням зміни концентрації кисню у реагуючій суміші та рівнянням взаємозв'язку концентрації кисню та деревинних частинок у суміші.

Таким чином сформовано математичну модель процесу спалювання здрібненої деревної біомаси, яка має вигляд:

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

де: χ – безрозмірна координата; Ω – безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі; Θ_{a0} – безрозмірна адиабатна температура паливо-повітряної суміші при початковій температурі $t = 0$ °С; Θ_1 – початкова безрозмірна температура; α – коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки; \bar{C} і $\bar{\mu}$ – поточні безрозмірні значення концентрацій кисню і деревинних частинок.

Безрозмірну температуру Θ , безрозмірну координату χ та безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі Ω слід визначати за такими формулами:

$$\Theta = \frac{RT}{E}. \quad (2)$$

$$\chi = x \frac{\beta k_0 C_0 \mu_0 f Q 273^2 R^3}{W_0 (c_n + \mu_0 c_d) E^3}, \quad (3)$$

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

де k_0 – константа швидкості реакції; E – енергія активації, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$; $R = 8,314$ – універсальна газова стала, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$; T – температура суміші, К ; C_0 і μ_0 – початкові концентрації кисню і деревинних частинок, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, затиску $0,1013$ МПа і температури 0°С ; f і Q – питома площа поверхні і теплота згорання деревинних частинок, $\frac{\text{м}^2}{\text{кг}}$ і $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; α_c – коефіцієнт тепловіддачі через стінку камери, $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; c_n , c_d – відповідно теплоємності, повітря, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$, теплоємність деревинних частинок, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; W_0 – швидкість руху суміші, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ при 0°С .

Оскільки під час розвитку процесу самозагорання зміна концентрації кисню та деревинних частинок є невеликою, то систему диференціальних рівнянь (1) зведено до одного рівняння:

$$\frac{1}{\Theta^2} e^{-1/\Theta} - \frac{d\Theta}{d\chi} - \Omega(\Theta - \Theta_1) = 0 \quad (5)$$

Рівняння (5) застосовано для дослідження процесу самозагорання здрібненої деревної біомаси за умови наявності тепловідведення від стінок камери згорання та без тепловідведення (адиабатні умови). Моделювання процесу самозагорання виконано для здрібненої деревної біомаси швидкоростучої верби *Salix*. За результатами моделювання встановлено, що

розвиток процесу самозагорання проявляється зміною по довжині камери трьох параметрів: росту температури, зменшення концентрацій деревинних частинок і кисню. Зокрема, визначено діапазони зміни безрозмірних параметрів, які відповідають реальним діапазнам зміни параметрів процесу спалювання здрібноної деревної біомаси: $\Omega = 0 \div 0,05$; $\Theta_1 = 0,045 \div 0,1$. Таким чином уточнено умови застосування математичної моделі процесу спалювання здрібноної деревної біомаси.

Для реалізації моделі (1) потрібно мати значення кінетичних констант процесу горіння деревної біомаси (передекспоненційного множника та енергії активації). Кінетичні константи процесу горіння різних порід деревини суттєво відрізняються, а довідкові дані не дають можливості реалізувати модель (1) з високою точністю. Тому для підвищення точності моделі (1) потрібно визначити кінетичні константи процесу горіння експериментальним шляхом.

За результатами аналізу методів дослідження кінетичних констант процесу горіння встановлено, що для точного визначення кінетичних констант слід застосувати комплексний термогравіметричний метод, що поєднує аналіз кривих зміни температури та маси зразка під час його нагрівання.

Для опису кінетики процесу горіння доцільно застосувати відоме рівняння:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k * (1 - \alpha)^n, \quad (6)$$

де k – константа швидкості реакції; α – ступінь розкладу речовини за певної температури, $\alpha = W/W_k$, W – втрата маси за температури T протягом деякого інтервалу часу, W_k – сумарна втрата маси в кінці реакції; n – порядок реакції; t – час. Однак для застосування рівняння (6) під час експериментальних досліджень доцільно перейти до зміни ступеня розкладу речовини залежно від температури зразка, а не від часу. Для цього введено до рівняння (6) швидкість зміни температури $q = dT/dt$. Застосувавши формулу Ареніуса в інтегральній формі для опису залежності константи швидкості реакції від температури, отримано рівняння:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{k_0}{q} * \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) * (1 - \alpha)^n, \quad (7)$$

де, крім позначень, застосованих вище, k_0 – передекспоненційний множник.

Рівняння (7) після логарифмування подано у вигляді :

$$D = ax + by + c, \quad (8)$$

де $x = \frac{1}{T} * 10^3$; $y = \ln\left(\frac{W_k - W}{W_k}\right)$; $D = \ln \frac{dW}{W_k dT}$; $a = \frac{-E}{R}$; $b = n$; $c = \ln \frac{k_0}{q}$.

Значення параметрів x , y , D можуть бути отримані під час експериментального дослідження процесу горіння термогравіметричним методом. Відповідно коефіцієнти a , b , c , що містять значення невідомих кінетичних параметрів, пропонується отримувати шляхом розв'язування системи рівнянь, отриманої за методом найменших квадратів:

$$\left\{ \begin{array}{l} a \sum_{i=1}^N x_i^2 + b \sum_{i=1}^N x_i y_i + c \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N x_i D_i; \\ a \sum_{i=1}^N x_i y_i + b \sum_{i=1}^N y_i^2 + c \sum_{i=1}^N y_i = \sum_{i=1}^N y_i D_i; \\ a \sum_{i=1}^N x_i + b \sum_{i=1}^N y_i + cN = \sum_{i=1}^N D_i, \end{array} \right. \quad (9)$$

де N – кількість значень, отриманих за результатами експерименту.

У третьому розділі представлено методику експериментальних досліджень процесу спалювання здрібненої деревної біомаси для отримання кінетичних констант цього процесу та застосовано вказану методику для дослідження зразків здрібненої деревної біомаси.

При дослідженні реакцій, що відбуваються під час процесу спалювання деревної біомаси, застосовують і методи термодинаміки, і методи хімічної кінетики. Для отримання кінетичних закономірностей повинні бути відомі не тільки початковий і кінцевий стани системи, а й шлях, по якому перебігає реакція, а він зазвичай заздалегідь невідомий. Знаючи ці закономірності (математичну модель) досліджуваної хімічної реакції (процесу) та її кінетичні параметри, можна розрахувати її швидкість та оптимальні умови перебігу процесу спалювання у реально діючих установках.

Для експериментального дослідження процесу спалювання зразків здрібненої деревної біомаси застосовано комплексний метод, який поєднує метод диференційної термогравіметрії і диференційного термічного аналізу. Цей метод передбачає поступове підвищення температури зразка деревини, поміщеного у спеціальну піч, а, відповідно, вимірювання та реєстрування маси зразка m (крива TG), швидкості зміни маси зразка dm/dt (крива DTG) залежно від температури T . Додаткову інформацію про перетворення в речовині під час її нагрівання (або охолодження) із заданою швидкістю отримують, записуючи криву зміни температури зразка, а також криву ДТА, яка відображає різницю температур T між взірцем і інертним еталоном. Диференційна термопара дозволяє чітко визначати перетворення у взірці, пов'язані зі зміною його ентальпії. Екзо- і ендоефекти відрізняються по спрямуванню піків на кривій ДТА.

Указаний комплексний метод дослідження зразків здрібненої деревини реалізовано за допомогою дериватографічної установки Q-1500 D (Paulik-Erdey).

Під час експериментальних досліджень виконано елементний аналіз досліджуваних зразків загальновідомим методом прямого нагрівання за допомогою індикаторів наявності певного хімічного елементу. Вміст азоту визначено згідно з ГОСТом 13301-67. Елементний аналіз виконано для 27-ми зразків деревини різних порід. Результати елементного аналізу окремих зразків подано у таблиці 1. Наявність даних про елементний склад деревини дає змогу

обчислити теплоту згорання деревини та підвищити точність математичної моделі (1).

Таблиця 1

Елементний склад окремих зразків деревини

№ п/п	Назва зразка деревини	C, %	H, %	S, %	O, %	N, %
1	Осика 35÷45 років (стовбура)	48,57	6,08	0,07	35	0,27
2	Осика 35÷45 років (кора)	53,92	5,78	0,03	31	0,71
3	Верба Salix (однорічні пагони)	47,3	4,18	0	13,72	0,6
4	Верба Salix (дворічні пагони)	51,82	4,57	0	10,2	0,51
5	Верба Salix (трирічні пагони)	55,75	4,72	0	8,01	0,36

Виконано експериментальні дослідження процесу горіння таких матеріалів: верба швидкоростуча (*Salix Viminalis*), осика, вільха, суміші деревини різних порід. Зокрема, нижче подано результати досліджень таких зрізів: однорічної верби *Salix Viminalis* дрібнодисперсної (зріз 1, розмір частинки 0,08 мм) і крупнодисперсної (зріз 2, розмір частинки 0,5 мм) та трирічної дрібнодисперсної (зріз 3, розмір частинки 0,08 мм) і крупнодисперсної (зріз 4, розмір частинки 0,5 мм). Результати термогравіметричного аналізу досліджених зрізів подані в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати термогравіметричного аналізу зрізів 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. 1–2 подані термограми дрібнодисперсних зрізів одно- та трирічної верби *Salix Viminalis*. На першій стадії термолізу зрізів 1 і 3, яка перебігає в області температур 20–170⁰С, відбуваються ендотермічні процеси,

зумовлені випаровуванням хімічно незв'язаної та конституційної води ($\Delta m = 10\%$).

На другій стадії, яка за даними диференційного термогравіметричного аналізу перебігає в області температур 170–270⁰С, поряд з ендотермічними процесами дегідратації та піролізу з відщепленням летких продуктів деструкції ($\Delta m = 20\%$), які супроводжуються різким зниженням ступеня полімеризації целюлози, розвиваються екзотермічні термоокисні деструктивні процеси, про що свідчить хід кривої DTA досліджуваних взірців верби Salix.

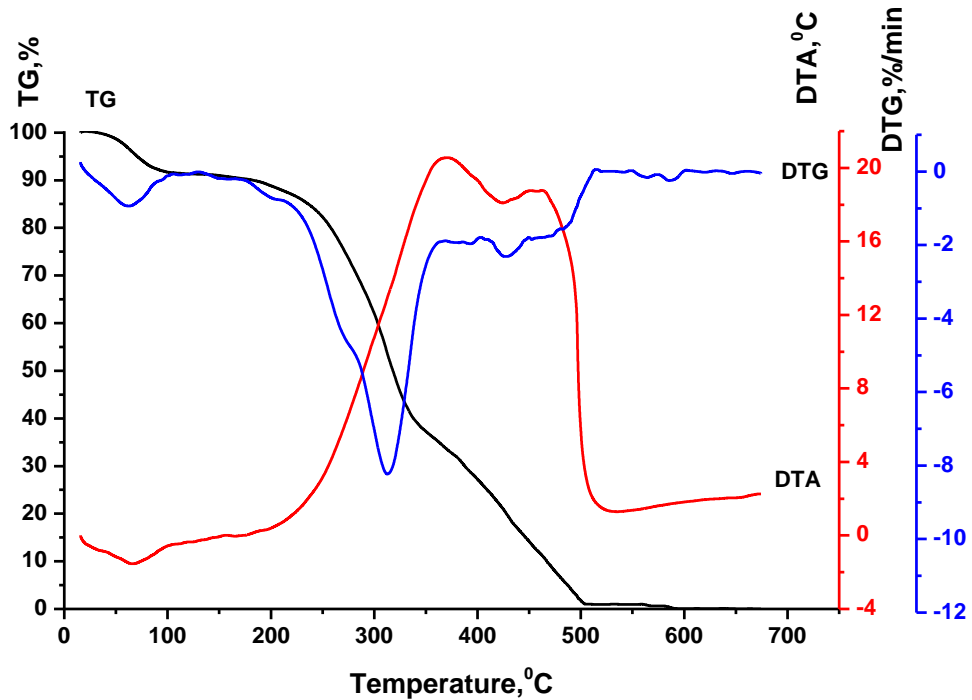


Рис. 1. Термограма взірця 1

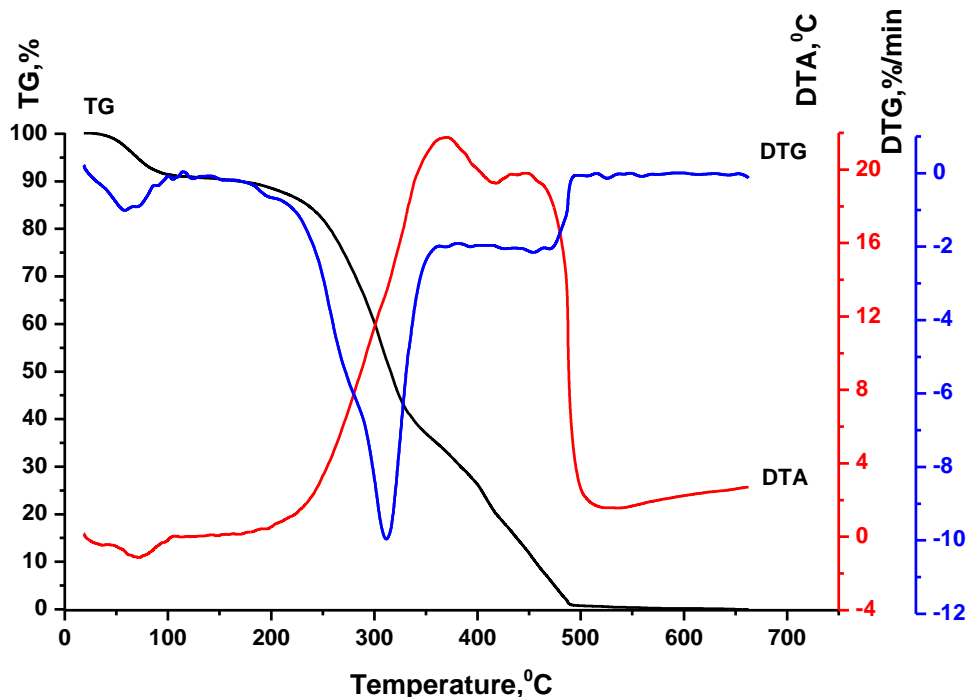


Рис. 2. Термограма взірця 3

На третій стадії термолізу (270–415⁰С), яка супроводжується найбільшою втратою маси взірців верби *Salix Viminalis* та появою яскравого екзотермічного ефекту на кривих ДТА, відбуваються активні термоокисні деструктивні процеси, які супроводжуються полуменевим горінням летких продуктів розкладу. Втрата маси взірця 1 на цій стадії становить 39%, взірця 3 – 40%.

На четвертій стадії термолізу, яка для взірця 1 відбувається за температур 415–516⁰С ($\Delta m = 31\%$), а для взірця 3 – в температурному інтервалі 415–500⁰С ($\Delta m = 30\%$), відбувається вигорання карбонізованого залишку зразків.

Процеси полуменевого горіння та згорання карбонізованого залишку у взірці 3 перебігають інтенсивніше, ніж у взірці 1. Про це свідчить більш інтенсивна втрата маси взірця трирічної верби *Salix Viminalis* на третій і четвертій стадіях термолізу, яка супроводжується появою більш високих екзотермічних ефектів на кривій ДТА цього взірця порівняно із взірцем однорічної верби (рис. 3). Отримані результати можна пояснити відмінностями в елементному складі взірців 1 і 3 (табл. 1). Взірець 3 відзначається більшим вмістом вуглецю $C=55,75\%$.

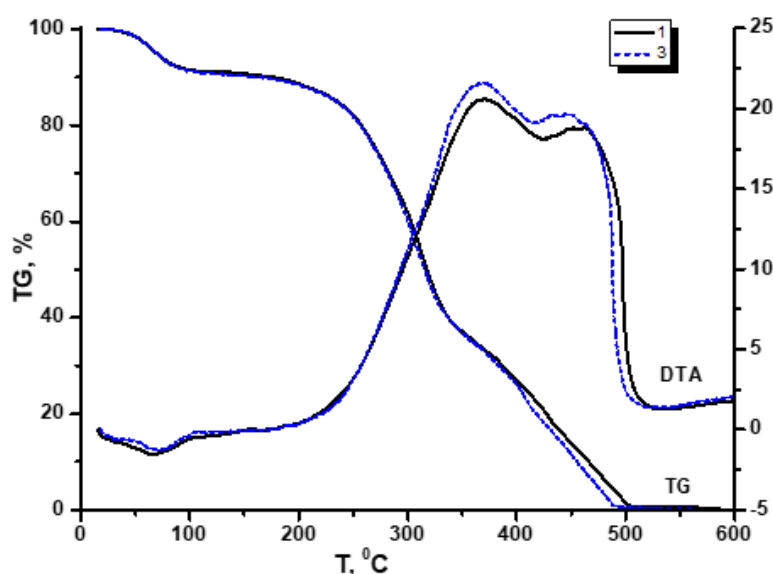


Рис. 3. Порівняння кривих ТГ і ДТА взірців 1 і 3

процесі їх нагрівання на всіх стадіях термолізу та поява менш яскравих ефектів на кривих ДТА цих взірців порівняно із взірцями 1 і 3 (рис. 4–5). Цей факт можна пояснити впливом на деструктивні, термоокисні та гетерогенно-окисні процеси площі поверхні взірців, яка зростає із збільшенням ступеня їх подрібнення.

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 здрібноної деревини.

На рис. 4 і 5 наведено порівняння кривих ТГ і ДТА взірців одно- та трирічної верби *Salix Viminalis* різного ступеня подрібнення.

Термоліз взірців верби швидкоростучої різного віку крупніших фракцій перебігає менш інтенсивно, ніж термоліз взірців *Salix Viminalis* дрібніших фракцій. Про це свідчить менш інтенсивна втрата маси взірців 2 і 4 в

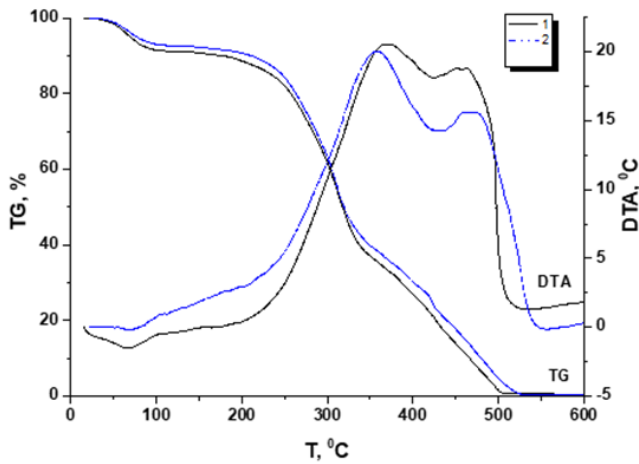


Рис. 4. Порівняння кривих TG і DTA зразків 1 і 2

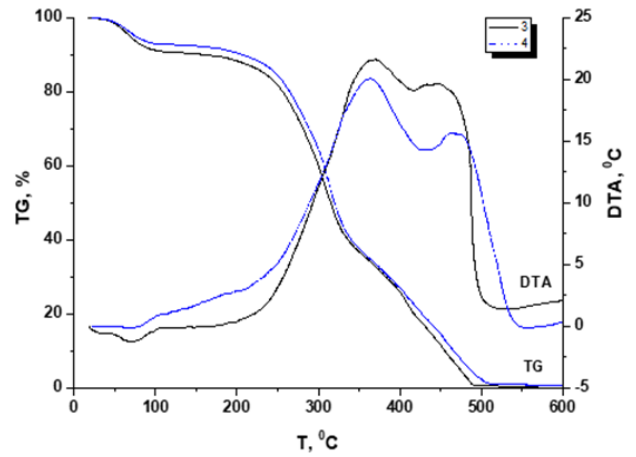


Рис. 5. Порівняння кривих TG і DTA зразків 3 і 4

У четвертому розділі подано результати опрацювання експериментальних даних, отриманих для досліджених зразків здрібненої деревної біомаси.

На основі дериватограм, отриманих під час експериментальних досліджень, розроблено аналітичні залежності втрати маси зразків деревини від часу, зокрема, для верби енергетичної *Salix* залежність втрати маси від часу має вигляд:

$$W = 2,162 \cdot 10^{-2} \cdot \tau^2 + 3,466 \cdot \tau - 14,176,$$

де τ – час перебігу процесу спалювання, сек.

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

$$\frac{dW}{d\tau} = 0,0432 \cdot \tau + 3,466. \quad (10)$$

Наявність аналітичної залежності втрати маси зразка від часу дає можливість реалізувати рівняння виду (3) та виконати моделювання перебігу процесу спалювання у часі, що важливо під час розроблення конструкції паливневих пристроїв.

Для визначення кінетичних констант процесу спалювання здрібненої деревної біомаси застосовано систему рівнянь (6), розроблену для знаходження параметрів лінеаризованого рівняння (5). Розв'язуючи систему рівнянь (6), отримано значення невідомих коефіцієнтів a , b , c , а відповідно – і значення кінетичних констант процесу горіння:

$$E = -aR; \quad k_0 = q \cdot e^c. \quad (11)$$

Значення кінетичних констант, отримані за результатами дослідження зразків верби *Salix*, подано у таблиці 2. Дослідження для цього виду деревини проведено в області ступенів перетворення зразка верби $\alpha \leq 0,55$ (табл. 2).

Для опису різних стадій реакції горіння здрібненої деревини отримано функціональні залежності $f(\alpha)$, яким відповідають найбільші значення коефіцієнтів кореляції залежності:

$$\ln \frac{d\alpha / dT}{f(\alpha)} = f\left(\frac{1}{T}\right). \quad (12)$$

Результати визначення кінетичних констант процесу спалювання деревини верби *Salix*

Інтервал α , %	Стадія	Вигляд функції $f(\alpha)$	E , 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	$0,039 \cdot 10^4$

Зокрема, для стадії нуклеалізації у досліджених діапазонах зміни ступеня перетворення α доцільно застосувати функцію $f(\alpha) = (1 - \alpha)$, для якої коефіцієнт кореляції залежності (12) та експериментальних даних $r \leq 0,99956$. Для стадії дифузії доцільно застосувати функцію $f(\alpha) = [1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^{-1} (1 - \alpha)^{2/3}$, для якої коефіцієнт кореляції залежності (12) та експериментальних даних $r \leq 0,99943$.

В п'ятому розділі виконано аналіз процесу спалювання здрібненої деревної біомаси із застосуванням математичної моделі у вигляді (5) та отриманих значень кінетичних констант процесу горіння, а також подано результати вдосконалення конструкції паливневого пристрою для спалювання здрібненої деревної біомаси.

Для моделювання процесу спалювання застосовано модель (5) із урахуванням тепловідведення до стінок камери згорання. Для отримання рівняння вигляду $\Theta = \Theta(\chi, \Theta_1)$, тобто функціональної залежності безрозмірної температури потоку суміші палива з повітрям у потоці гарячих паливневих газів від безрозмірної координати і початкової температури суміші, виконано інтегрування рівняння (5) за початкової температури суміші частинок деревини і повітря $t_1 = 5, 10, \dots, 50$ °С числовим методом за допомогою пакету Mathcad.

Як видно з формули (4), для окремого зразка здрібненої деревної біомаси з відомим елементним складом коефіцієнт тепловіддачі Ω залежить від коефіцієнта надлишку повітря α_n (який впливає на значення концентрації кисню), а також від розміру деревинних частинок (впливає на значення площі поверхні реагування деревинних частинок). Тому в роботі досліджено залежності $\Theta(\chi, \Theta_1)$ за умов зміни двох указаних параметрів. Зокрема, приймаючи, що α_n змінюється в межах: $\alpha_n = 1,0 \dots 4,0$, отримали відповідні залежності $\Theta = \Theta(\chi, \Theta_1)$, що подані на рис. 6.

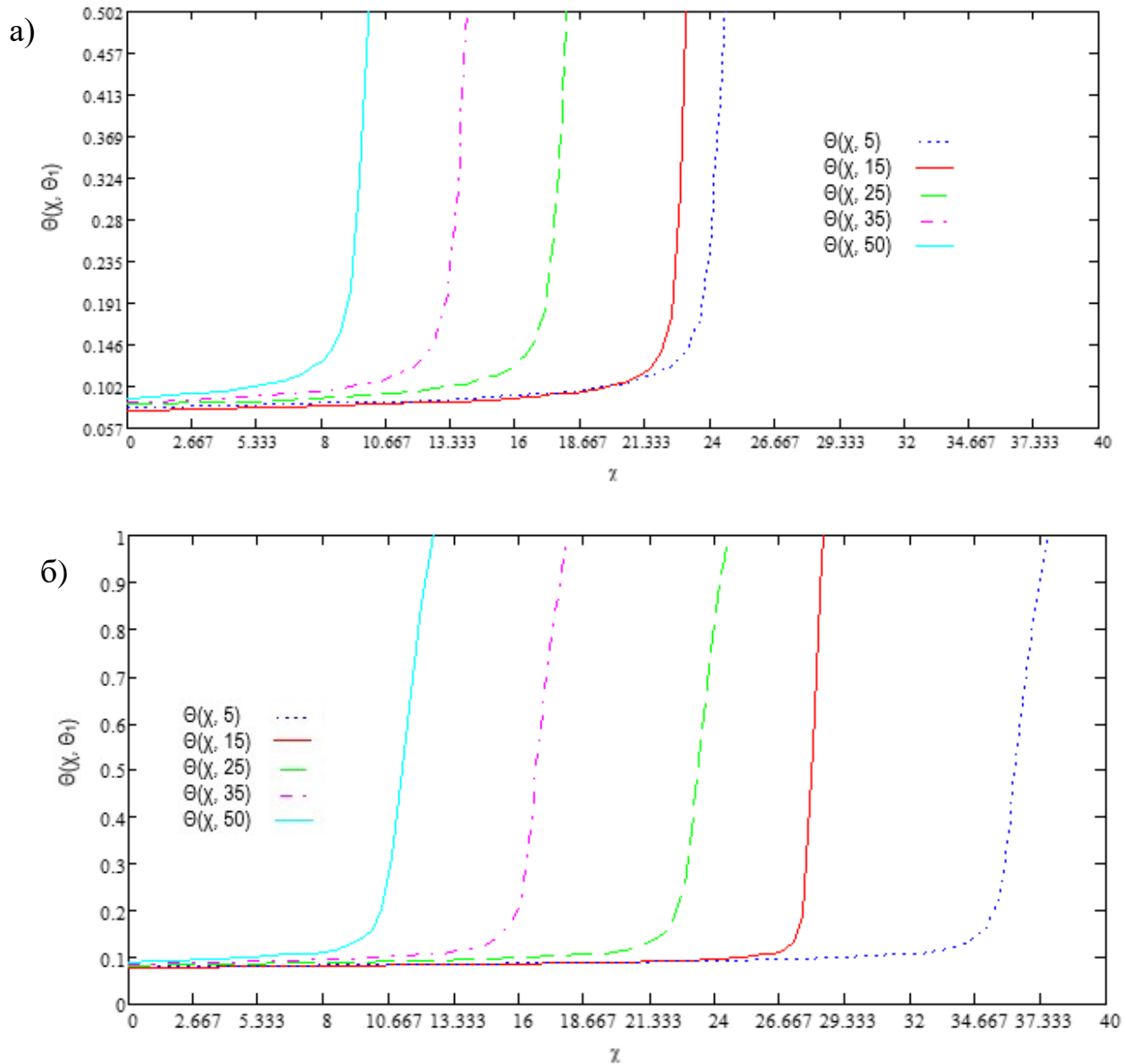


Рис.6. Залежність безрозмірної температури трирічної верби *Salix* від безрозмірної координати χ за коефіцієнта надлишку повітря:
а) $\alpha_n = 1,09$; б) $\alpha_n = 1,91$

Із рис. 6 видно, що довжина ділянки загорання паливо-повітряної суміші значно залежить від початкової температури суміші (температури стінок камери згорання), а також від коефіцієнта надлишку повітря. Зокрема, значення безрозмірної довжини ділянки самозагорання χ , отримані для різних значень коефіцієнта надлишку повітря α_n для одного із значень безрозмірної початкової температури суміші, подано у табл. 3. Із таблиці 3, а також з рис. 6, видно, що реалізація процесу горіння з коефіцієнтом надлишку повітря α_n більшим від 1,3 призводить до суттєвого зростання коефіцієнта тепловіддачі Ω , довжини ділянки самозагорання 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 ККД котлоагрегату потрібно забезпечити значення коефіцієнта α_n у діапазоні від 1,1 до 1,35.

Збільшення ступеня здрібнення деревини призводить до збільшення поверхні реагування деревинних частинок і підсилює інтенсивність перебігу в них деструктивних, термоокисних і гетерогенно-окисних процесів при нагріванні. За результатами аналізу дериваторам, а також залежностей $\Theta(\chi, \Theta_1)$, отриманих для зразків деревини різного ступеня подрібнення (зокрема, для зразків верби *Salix* з розміром частинки від 0,08 до 1,0 мм), встановлено, що збільшення розміру частинки незначно впливає на відносну довжину ділянки самозапалювання деревної суміші, однак зменшує швидкість зміни температури на стадії горіння а, отже, збільшує тривалість процесу горіння, що необхідно врахувати під час проектування паливневих пристроїв.

Слід врахувати, ефективність спалювання деревини більш тонкого здрібнення підвищується, зважаючи на зменшення теплових втрат унаслідок хімічного та механічного недопалу (q_3 і q_4), однак експлуатаційні витрати на здрібнення значно зростають зі збільшенням тонкості здрібнення. Зіставлення того й іншого дає змогу обрати оптимальну величину тонкості здрібнення.

Таблиця 3

Залежність параметрів процесу самозагорання від коефіцієнта надлишку повітря

Коефіцієнт надлишку повітря α_n	1	1.01	1.09	1.3	2	4
Безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі Ω	0.0234	0.0238	0.0277	0.0395	0.0552	0.3536
Довжина ділянки само-загорання χ для $\Theta_1 = 0.0878$ (50°C)	8.06	8.07	8.49	9.12	10.33	∞

У роботі досліджено також вплив зольності деревини на процес горіння. Зокрема, на рис. 7 подано залежність безрозмірної температури реагуючої суміші за температури стінок камери згорання $t_1 = 5$ °C та зольності верби *Salix* ($A=0,84 \div 1,18\%$) від безрозмірної довжини камери згорання χ .

Із рис. 7 видно, що підвищення зольності деревини призводить до збільшення довжини ділянки самозапалювання. Зокрема, для досліджених зразків верби *Salix* збільшення становило приблизно 6,2% від довжини ділянки самозапалювання для зразка з найменшою зольністю ($A=0,84\%$).

На основі результатів виконаних досліджень розроблено конструкцію паливни для забезпечення максимального ККД під час спалювання здрібненої деревної біомаси (див. рис. 8).

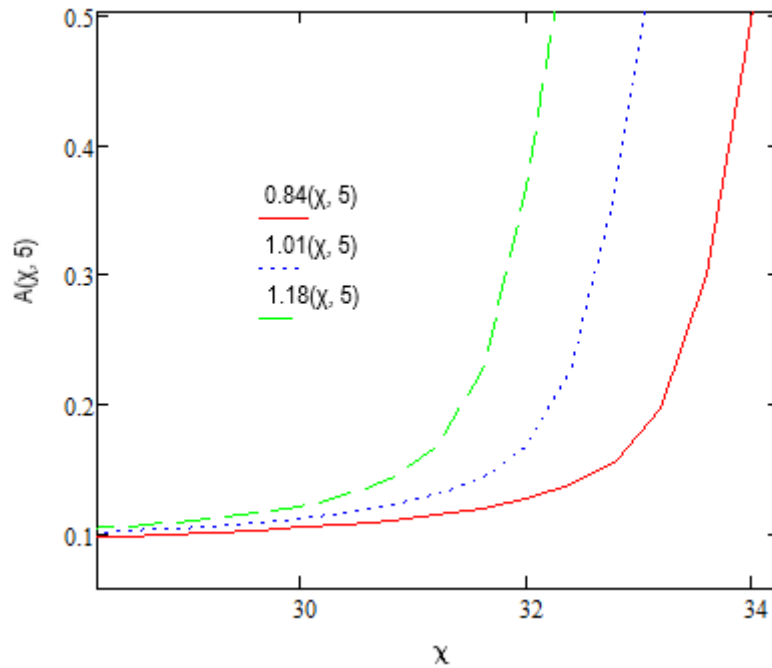


Рис.7. Залежність безрозмірної температури реагуючої суміші (за температури $t_1 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ та зольності верби Salix $A=0.84\div 1.18\%$) від безрозмірної довжини x

Для підвищення ефективності процесу спалювання здрібненої деревної біомаси зроблено такі вдосконалення конструкції паливни: введено виступи 7, 8 для створення вихору в основній камері згорання, а також додатковий пальник у камері допалювання, за допомогою якого створюється додатковий вихор спалюваної деревної суміші; застосовано стелю півсферичної форми для основної камери спалювання та камери опалювання, що дає можливість досягнути більш ефективного розподілу теплових потоків; для більш ефективного спалювання деревної біомаси передбачено одночасну подачу повітря для інтенсифікації горіння в основній камері згорання сумісно з шнековою подачею деревної біомаси; застосовано економайзерну колосникову решітку, що зменшує енергетичні затрати на підігрів води та затрати в металі на виготовлення колосникової решітки.

Під час проектування котельного агрегату з запропонованою конструкцією паливни потрібно забезпечити газодинамічний режим паливни так, щоб виконати сформовані вимоги до коефіцієнта надлишку повітря та довжини ділянки самоzapалювання суміші.

Конструкція паливни, зображена на рис. 8, пропонується для застосування в котлах малої та середньої потужності. Для котлів середньої та великої потужності розроблено конструкцію, яка передбачає подавання здрібненої деревної суміші на обертову колосникову решітку (див. рис. 9).

Паливневу камеру (див. рис. 9) запропоновано 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.

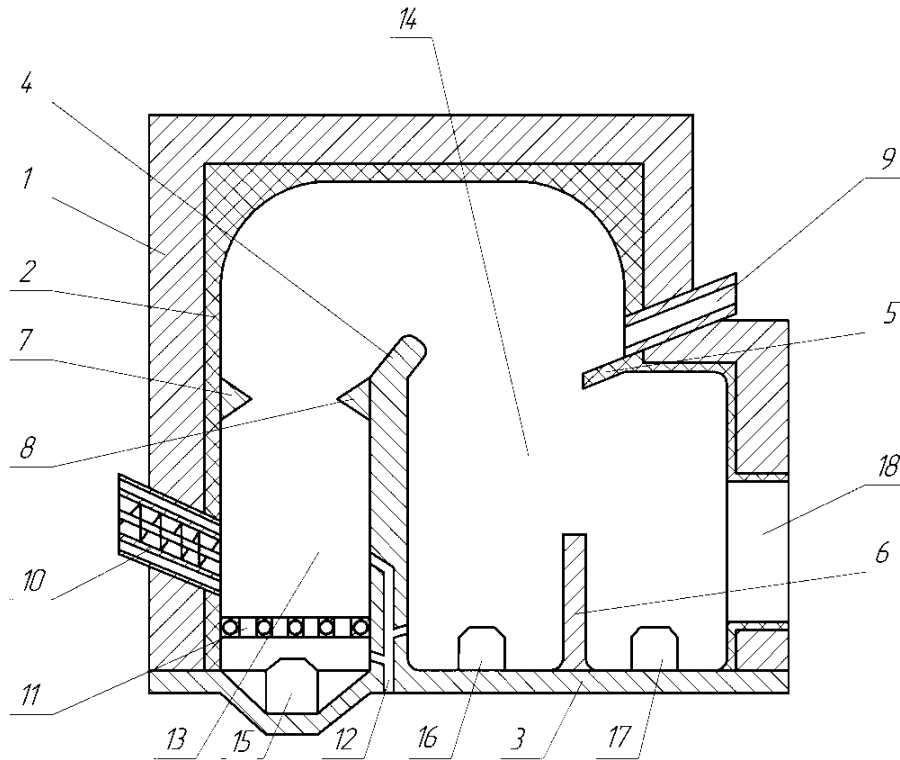


Рис. 8. Камерна паливня для спалювання здрібненої деревної біомаси

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.

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 *Salix* – 30%.

Камера згорання (ПК) є висхідним газоходом. У нижній частині ПК розташована колосникова решітка (КР); ПК має циліндричну форму. Вгорі ПК виконаний пережим, який формує додаткове завихрення потоку та відділяє основну камеру від секції догорання. Пережим ефективно відбиває випромінюване тепло від вогнетривкої футеровки і полум'я в центр КР, що поліпшує процес висушування сирого палива, яке потрапляє на решітку.

Колосникова решітка складається з кілець різного діаметра. Верхнє кільце має найменший діаметр. Кожне наступне кільце є більшого діаметра й розташоване 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.

Для експериментального зразка котла із запропонованою конструкцією паливні оптимальні значення коефіцієнта надлишку повітря становлять $\alpha_{\text{п}} = 1,22\text{--}1,37$ у діапазоні навантажень 100–50% номінального і під час спалювання деревної тріски, і під час спалювання суміші деревної тріски й верби.

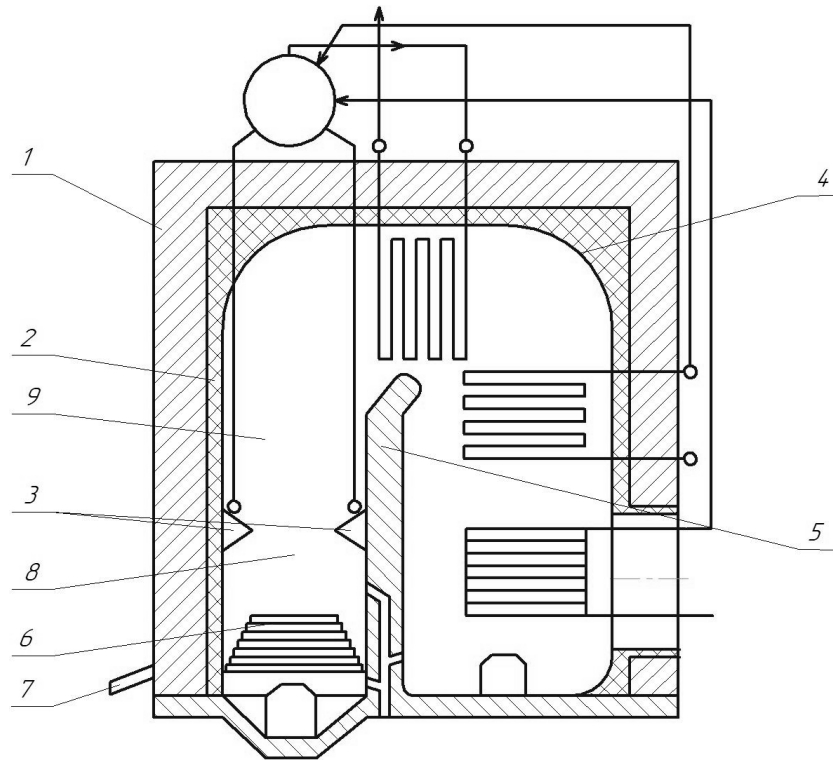


Рис. 9. Камерна паливня із обертовою колосниковою решіткою для спалювання здрібненої деревної біомаси:

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

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

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-технічне завдання, розроблено наукові основи процесу спалювання здрібненої деревної біомаси та підвищено ефективність паливних пристроїв для її спалювання. В процесі виконання роботи отримано такі результати і висновки:

1. Виконано аналіз особливостей процесу спалювання здрібненої деревної біомаси з розміром частинок від 0,08 мм до 1 мм, теплоенергетичних характеристик і паливних 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 сформувані 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 відносно втрати маси зразка верби енергетичної *Salix* від оберненої температури зразка, що дає можливість проаналізувати перебіг стадій процесу горіння зразка та сформувані 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 паливель запропонованої конструкції дозволяє підвищити ККД котельного агрегату на 1,0 ÷ 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%.

ПУБЛІКАЦІ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Статті у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз

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 паливни підвищеної ефективності. *Науковий вісник НЛТУ України*: зб. наук.-техн. праць. Львів : НЛТУ, 2017. № 27.6. С. 131–134.

Статті у наукових фахових виданнях України

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.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав (розділи монографій)

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.

Патенти України

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.

Матеріали конференцій

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. Yalechko, 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. Yalechko V. Investigation of combustion process low-grade fuels / V. Yalechko, 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., Yalechko 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., Yalechko 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. Kapuňany pri Preňove, Bardejovské kúpele, 06–08.11.2013. P. 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.

АНОТАЦІЯ

Ялечко В. І. Підвищення ефективності енерготехнологічного процесу спалювання дрібної 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 теплоенергетика. – Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуального завдання – розвитку наукових основ процесу спалювання дрібної 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 відносної 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 теплоэнергетика. – 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 неізотермического 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 Ministry of Education and Science of Ukraine, 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 of combustion process research. 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 on 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.