

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

МИРОШНИК МАРІЯ МИКОЛАЇВНА

УДК 662.63

КІНЕТИКА ТЕРМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ ОКРЕМИХ ВИДІВ БІОМАСИ ЯК
АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА

Спеціальність: 05.14.06 - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій МОН України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Засядько Ярослав Іванович,
Національний університет харчових технологій, м. Київ,
професор кафедри теплоенергетики та холодильної
техніки

Офіційні опонент: доктор технічних наук, професор
Ткаченко Станіслав Йосипович,
Вінницький національний технічний університет,
м. Вінниця,
завідувач кафедри теплоенергетики

доктор технічних наук, професор
Дешко Валерій Іванович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, ,
завідувач кафедри теплотехніки та енергозбереження

Захист відбудеться « 29 » квітня 2013 року о 14-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, ауд. А-311.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий « 29 » березня 2013 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К 26.058.05,
к. т. н., доцент

В. М. Філоненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Актуальність роботи. Енергетика на базі відновлюваних джерел стала потужною складовою у світовому енергетичному комплексі, частка якої до того ж відзначається постійним зростанням і особливо актуальною вона є для енергодефіцитних країн. В умовах недостатнього забезпечення України власними паливно-енергетичними ресурсами перехід на альтернативні джерела енергопостачання є надважливим у контексті гарантування енергетичної безпеки держави. Серед відновлюваних джерел енергії біомаса посідає особливе місце, оскільки її щорічний поновлювальний потенціал оцінюється в 10 разів більше, ніж світовий видобуток корисних копалин, а для отримання енергії потрібні незначні фінансові витрати на переобладнання існуючого устаткування. Ефективне використання біомаси, як окремого виду палива, так і у суміші з вугіллям, дозволяє суттєво зменшити викиди NO_x , викиди CO_2 , а вивільнення відвалів біомаси (бурякового жому) - зменшити викиди анаеробного CH_4 .

Відходи сільського господарства та деревообробної промисловості складають найбільшу групу щорічно поновлюваної біомаси. Проте, помітне зменшення запасів деревини та погіршення екологічної ситуації обумовлюють необхідність раціонального використання відходів виробництва рослинного походження в повному об'ємі. Доречним є збільшення використання відходів цукрової промисловості. Серед переробних галузей агропромислового комплексу найбільш ресурсомісткою є саме цукрове виробництво, в якому об'єм використаної сировини та допоміжних матеріалів в декілька разів перевищує вихід готової продукції. Тому, навіть незначне збільшення показників ефективності енергетичного використання бурякового жому, можуть призвести до значного економічного ефекту. Потрібно враховувати, що через недостатню вивченість бурякового жому як палива не можливо досягнути оптимальних показників роботи топкових пристроїв.

Практична реалізація заходів, які направлені на підвищення ефективності спалювання та термічної переробки біомаси, ускладнюється недостатньою обізнаністю в механізмі та кінетичних характеристик процесів їх термічної деструкції. Тому експериментальне визначення вищезазначених показників стає особливо актуальним.

Перспективним засобом вирішення вказаних проблем видається використання методів комплексного термічного аналізу та математичного моделювання. Одним із завдань вищезгаданого підходу є необхідність визначення кінетичних характеристик біомаси на окремих етапах термохімічного перетворення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась згідно плану держбюджетної науково-дослідної тематики кафедри теплоенергетики та холодильної техніки НУХТ “Розроблення наукових основ створення вискооефективного тепломасообмінного обладнання для харчової промисловості” (номер державної реєстрації №0112U002987) та у відповідності з тематикою науково-дослідної роботи НУХТ “Створити фізико-технічні засади підготовки, попередньої обробки та спалювання

відходів переробки сільгоспсировини з метою розроблення методів та технологій її утилізації в енергетичному секторі” (2008-2009 рр., номер державної реєстрації №0108U000259).

Автором особисто розроблені задачі, методики досліджень, математичні моделі, проведені експериментальні дослідження, здійснено оброблення та узагальнення їх результатів.

Мета і задачі дослідження. Мета даної роботи – встановлення механізму термічної деструкції деяких видів біомаси для кращого розуміння перебігу процесу, отримання кінетичних характеристик окремих стадій термохімічного перетворення біомаси для подальшого моделювання топкового процесу, розробки та вдосконалення існуючого обладнання.

Для її реалізації поставлені наступні завдання :

- § дослідити процес термічної деструкції різних типів біомаси в повітряному середовищі;
- § визначити температурні діапазони енерготехнологічної переробки біомаси;
- § вдосконалити методику визначення кінетичних характеристик окремих етапів термохімічного перетворення біомаси, зокрема, процесів випаровування води та виходу летких речовин;
- § визначити на основі експериментальних даних енергію активації та передекспоненціальний множник для рівняння Арреніуса для окремих стадій спалювання біомаси;
- § розробити математичну модель процесу прогріву та виходу летких з біомаси з урахуванням стадії зневоднення;
- § дослідити сумісне спалювання вугілля та біомаси на пілотній установці ВГП-100В Інституту вугільних енерготехнологій НАН України (ІВЕ АН України).

Об’єкт дослідження – комплекс процесів термохімічного перетворення біомаси .

Предмет дослідження – окремі види твердої біомаси.

Методи дослідження. Математичне моделювання процесу термічної деструкції біомаси в окислюючому середовищі з врахуванням механізмів окремих етапів перетворення біомаси, зокрема, процесів випаровування води та виходу летких речовин. Експериментальне дослідження за допомогою активного експерименту на дериватографі Q-1500 та ВГП-100В (ІВЕ АН України). Обробка, аналіз та узагальнення дослідних даних і даних математичного моделювання за допомогою програм MS Excel та MathCad.

Наукова новизна одержаних результатів визначається тим, що вперше:

- § отримано експериментальні дані з кінетичних констант окремих видів вітчизняної біомаси, як енергетичного палива, для процесів видалення води та виходу летких речовин;
- § визначено температурні діапазони енерготехнологічної переробки окремих видів біомаси;
- § розроблено математичну модель зневоднення біомаси та виходу летких з неї у потоці продуктів згоряння;

§ підтверджено відповідність розробленої моделі стадії прогріву, зневоднення та виходу летких речовин у застосуванні до процесу спалювання на пілотному стенді ВГП-100В (ІВЕ АН України).

Удосконалено:

§ методику визначення кінетичних характеристик біомаси при нагріванні в окислювальних умовах.

Набули подальшого розвитку:

§ дослідження процесу спільного спалювання біомаси з високозольним вугіллям та природним газом і показана можливість заміщення частини газу, споживаного на стабілізацію факелу, за рахунок надвишку летких у біомасі.

Практичне значення отриманих результатів:

§ Розроблено методику обробки результатів комплексного термічного аналізу, яка може бути використана для визначення кінетичних характеристик окремих стадій термохімічного перетворення біомаси.

§ Отримано кінетичні параметри (передекспоненціальний множник та енергія активації), які дозволяють адекватно відображати взаємозв'язок між масовими та тепловими балансами у процесі спалювання, розрахувати тривалість окремих стадій термохімічного перетворення, раціонально організовувати розрахунково-конструкторські розробки енергетичних та промислових топкових пристроїв для спалювання, а також установок для сушки та термічної переробки окремих видів твердої біомаси.

§ Отримано кінетичні характеристики, які можуть бути використані в математичних моделях для оптимізації перебіг процесу горіння в промислових установках і, як наслідок, забезпечувати максимальну ефективність.

§ Отримані кінетичні характеристики можуть бути покладені у формування вітчизняної бази даних паливних характеристик біомаси.

§ Розроблено математичну модель стадій прогріву, видалення вологи та виходу летких речовин з подрібненої біомаси із заданим розподілом фракційного її складу для пілотної установки ВГП-100В (ІВЕ АН України).

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні та розробці наукових положень дисертації, вдосконаленні методики визначення кінетичних характеристик окремих етапів термохімічного перетворення біомаси, розробці математичної моделі зневоднення та виходу летких речовин з біомаси, проведенні досліджень по спільному спалюванню бурякового жому з високозольним вугіллям, аналізі й узагальненні результатів натурних та математичних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на 75-78-й наукових конференціях молодих вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (м. Київ, НУХТ, 2009-2012 рр.); на міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодення та перспективи» (м. Київ, НУХТ, 2010 р.); на II міжнародній науково-технічній конференції «Земля України – потенціал енергетичної та екологічної безпеки держави» (м. Вінниця,

ВНАУ, 2011 р.); на EFFoST Annual Meeting «Process – Structure – Function Relationships» (м. Берлін, Technische Universität Berlin, 2011 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 8 друкованих праць, у тому числі: 3 статті у наукових фахових журналах та 1 у збірнику наукових праць, перелік яких затверджено ВАК України, 4 – в тезах доповідей на наукових конференціях.

Структура та об'єм роботи. Робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, 4 додатків. Основні матеріали викладені на 129 сторінках друкованого тексту, які містять 59 рисунків і 22 таблиць. Перелік літератури включає 140 джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи. Сформульовано мету та задачі дослідження. Визначені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Вказано на апробацію результатів та кількість публікацій.

Аналітичний огляд літератури.

Проаналізовано розподіл запасів біомаси в Україні. Проведено порівняльний аналіз основних властивостей біопалива та вугілля.

Наведено огляд світового досвіду з впровадження технологій енергетичного використання біомаси та спільного спалювання біомаси з вугіллям. Визначено, що установки з факельним спалюванням біомаси та вугілля мають найвищий коефіцієнт корисної дії та економічний ефект, а також найменші затрати на переобладнання існуючого обладнання.

Представлені основні теоретичні відомості з кінетики горіння твердого палива. Проаналізовано роботи різних авторів з визначення кінетичних параметрів окремих видів біомаси. З наявних в літературі даних встановлено, що кінетичні характеристики суттєво різняться, що обумовлено відмінністю методик дослідів і застосованих методів обробки та узагальнення даних.

Обґрунтовано необхідність детального вивчення кінетичних характеристик біомаси, як індивідуальних видів палива, а також у сумішах з вітчизняним вугіллям і особливо на стадіях зневоднення та виходу летких, оскільки у літературі повністю відсутні дані з кінетики виходу вологи та летких для вітчизняних видів біомаси.

На основі аналізу літературних даних зроблені наукові висновки, сформульовані конкретні завдання досліджень.

Експериментальна установка та методика проведення дослідів.

Виконано теоретичне дослідження умов проведення експерименту та методів аналізу термогравіметричних даних. Дослідження процесу термічної деструкції біомаси проводилися на базі серійного дериватографа Q-1500 (рис. 1). Даний прилад дозволяє одночасно автоматично реєструвати зміну температури нагріву зразка - T ; зміну маси досліджуваної речовини - TG , швидкість зміни маси речовини - DTG ; тепловий ефект реакції - DTA . Прилад укомплектовано шестиканальним самописцем із межами вимірювань по кожному каналу від 50 мкВ до 5 мВ/250 мм. Дослідження процесу термічного розкладання виконувалися для проб бурякового жому, соснової тирси, пшеничної соломи та соняшникового

лушпиння. Вага навіски складала 50 ± 4 мг, точність вимірювання при цьому складала $\pm 1\%$. Зразки нагрівалися від кімнатної температури ($25 \pm 3^\circ\text{C}$) до 900°C з постійною швидкістю $20^\circ\text{C}/\text{хв.}$ в умовах окислюючого середовища (повітря). Паливо попередньо подрібнювалося та просіювалося через сита, щоб мати майже монодисперсну структуру із розміром часток 1-3 мм.

Первісні експериментальні дані було отримано у вигляді термогравітограм, дериватограм та графічних файлів. Критичним моментом обробки даних є визначення взаємопов'язаних відповідних значень поточної маси зразка, його температури та величини похідної від зміни маси у певні фіксовані моменти. Тобто, усі зазначені параметри повинні фіксуватися в один і той же момент часу. Крім того, суттєвим моментом є визначення масштабуючого коефіцієнта для розрахунку значень похідної, що відповідали б кривій втрати маси, та виокремлення етапів термохімічного перетворення палива, а саме стадії зневоднення, виходу летких речовин та окиснення коксового залишку.

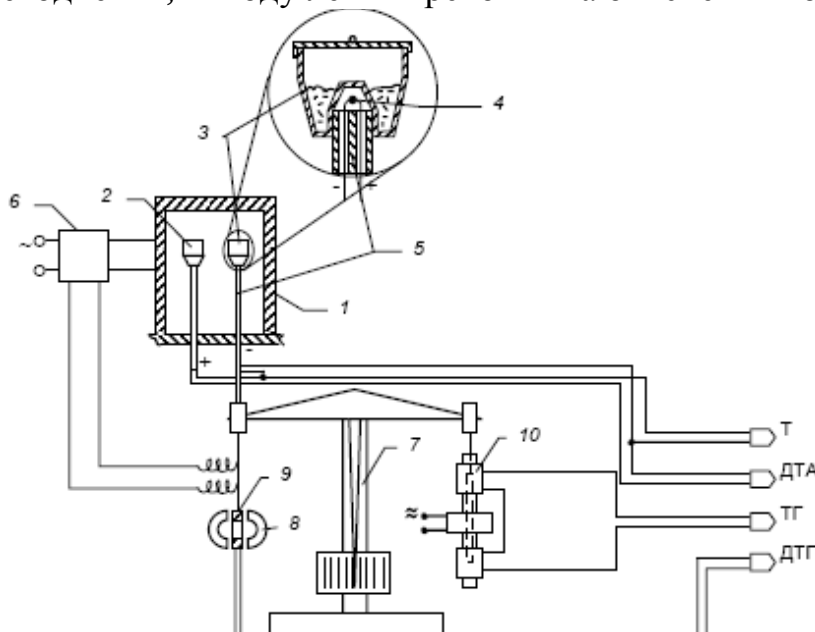


Рис. 1. Принципова схема та зовнішній вигляд дериватографа:

1 – піч; 2 – тигель з інертною речовиною; 3 – тигель з дослідною речовиною; 4 – спай термопари; 5 – керамічна трубка; 6 – регулятор нагріву; 7 – ваги; 8 – магніт; 9 – котушка; 10 – диференціальний трансформатор перетворення ТГ.

Обробка експериментальних даних, а також визначення похідної від зміни маси, маси зразка та його температури у певні фіксовані моменти часу виконувалися на основі оцифровки графічних файлів за допомогою спеціальної програми - *Bytescout Graph Digitizer Scout 1.2.4* ([site](http://www.bytescout.com)), яка дозволяють отримати цифрові файли відповідних величин із частотою у реальному часі до 2 точок на секунду (рис. 2). Використовуючи програму MS Excel, було отримано узагальнюючі залежності $T=f(\tau)$, які в основному описувались як лінійні функції, і використовувалися для трансформації $m=f(\tau)$, $dm/d\tau=f(\tau)$ у вигляді температурних залежностей $m=f(T)$ та $dm/d\tau=f(T)$ для подальшого обрахунку.

Для визначення температурних інтервалів окремих етапів термохімічного перетворення на кривій $dm/d\tau$ визначаються три різні температури:

- T_0 – початкова температура стадії, де вага складає 0.975 від початкової маси наважки;
- $T_{\max}$ – максимальна температура стадії процесу, де друга похідна $d^2m/d\tau^2 = 0$.
- T_k – кінцева температура стадії, де крива dm/dt мала мінімальні значення, тобто де друга похідна від функції зміни маси проходить через нульове значення.

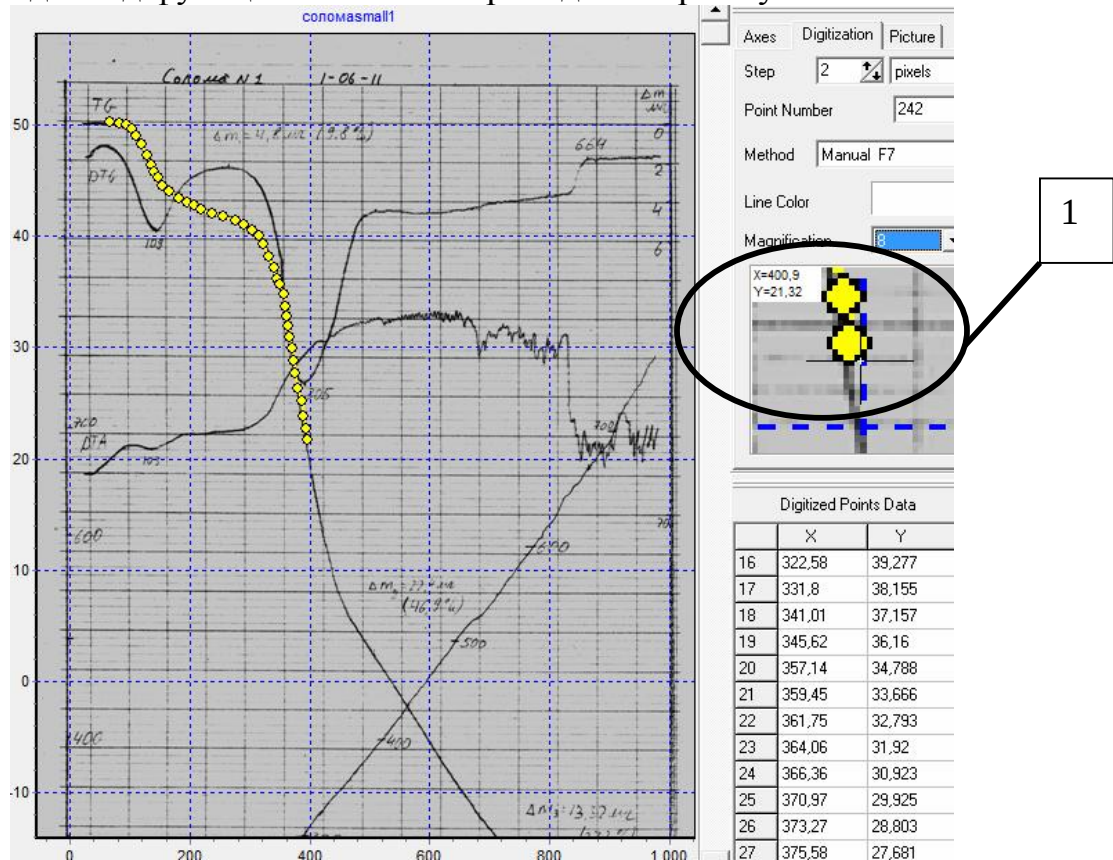


Рис. 2. Отримання цифрового файлу для пшеничної соломи за допомогою Bytescout Graph Digitizer Scout 1.2.4:

1 – вікно збільшення для забезпечення найменшого кроку в часі.

У основу методів обробки експериментальних даних покладений опис процесів термічної деструкції кінетичним рівнянням першого порядку (1), що встановлює зв'язок між миттєвим значенням зміни ступеню конверсії у часі від константи швидкості реакції та певної функції, яка відображає миттєву концентрацію речовин, що підлягає конверсії. У випадку реакції першого порядку $f(a) = 1 - a$.

$$-\frac{da}{dt} = k \cdot f(a), \quad (1)$$

де a – ступінь конверсії; τ – час; k – константа швидкості реакції; $f(a)$ – функція, яка описує певну модель реакції.

Ступінь конверсії визначається на основі даних термогравітограм за формулою (2).

$$a = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_\infty}, \quad (2)$$

де m_0 – початкова маса зразка; m_t – поточна маса зразка; m_∞ – маса зразка після закінчення процесу.

Константу швидкості реакції можна визначити з рівняння Арреніуса (3):

$$k = A \cdot \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (3)$$

Для розрахунку кінетичних сталих процесу видалення вологи та виходу летких речовин, експериментальні дані було представлено у нормалізованому вигляді $\alpha=f(\tau)$ який, у свою чергу, перераховується з гравітограми за допомогою співвідношення (2) відносно початкової маси води чи летких відповідно. Діапазон зміни α , виходячи із його визначення, знаходиться в межах 0...1, а відповідні значення похідної da/dt у рамках прийнятого припущення про 1-й порядок реакції мають приймати нульові значення у початковій та кінцевій точках окремого етапу конверсії. Відзначене стосуватиметься виключно ідеалізованого процесу. На практиці на початку процесу da/dt має нульове значення, проте, по ходу процесу конверсії спостерігається перехід кривої da/dt через локальний екстремум і подальше зниження, при чому нульове значення похідної не досягається для усіх експериментальних серій. Це пояснюється тим, що стадії термічного розкладання мають плавний перехід: як правило, стадія зневоднення плавно переходить у стадію виходу летких речовин, а вихід летких – у окиснення коксового залишку. Оскільки в результаті планується отримати розрахункові співвідношення для обрахунків стадії зневоднення та виходу летких речовин, то видається обґрунтованим прийняти припущення про закінченість цих стадій. Тобто, не зважаючи на можливі відхилення значень похідної da/dt наприкінці процесу, прийемо для апроксимації та масштабування, що в кінцевих точках процесу da/dt набуває нульових значень.

Знайдену таким чином еквівалентну криву для функцій $\alpha(\tau)$ з нульовими значеннями на початку та в кінці процесу, використаємо для масштабування експериментальної кривої da/dt .

Масштабування експериментальної дериватограми виконувалося наступним чином. Оцифровані дані використовувалися для побудови кривої $\alpha=f(\tau)$ у програмі MathCad 14 (рис. 3) з наступною інтерполяцією даних та апроксимацією кривої за допомогою операторів *paramsc*, *cspline*, *fitc*, *interp*.

Отримана апроксимаційна крива диференціювалася числовими методами, і значення похідних у визначених точках табулювалися і використовувалися для визначення масштабуючих коефіцієнтів при розрахунках значень похідної da/dt .

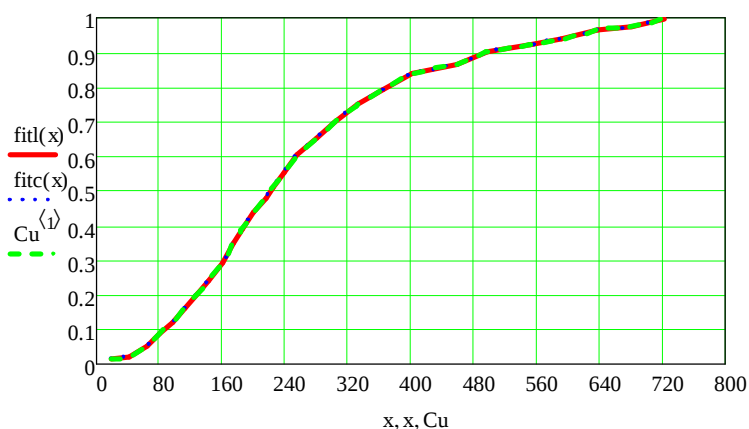


Рис. 3. Апроксимація кривої ступеня конверсії за допомогою програми Mathcad.

Додатково масштабуючі коефіцієнти визначалися за допомогою прикладних програм *DataFit 9*, *LabFit* та *Curve Expert Professional 1.2*. У зазначених програмах вбудовано функції інтерполяції, згладжування та апроксимації з подальшим диференціюванням апроксимаційної кривої та видачею інформації у графічному чи числовому вигляді.

Для розрахунку кінетичних характеристик біомаси окремих стадій горіння, було використано диференційний (4) та інтегральний (5) методи з припущення щодо першого порядку реакції.

$$\ln\left(\frac{1}{1-a} \frac{da}{dt}\right) = -\frac{E}{RT} + \ln A, \quad (4)$$

$$\ln\left[-\ln(1-a)b / T^2\left(1-2\frac{RT}{E}\right)\right] = \left(-\frac{E}{RT}\right) + \ln \frac{AR}{E} \quad (5)$$

В обох методах для визначення кінетичних констант рівняння Арреніуса експериментальні дані, отримані за допомогою ТГА та оброблені відповідним чином, зображуються у вигляді залежностей від зворотної температури. При цьому дані апроксимуються прямими з кутом нахилу $-E/R$ та відтинком ординати, що певним чином відображає константу A .

Розроблено послідовність визначення кінетичних характеристик багатостадійних процесів термічної деструкції біомаси, а також побудови ТГ-кривої стадії залежно від температури.

Результати експериментальних досліджень.

Аналіз отриманих дериватограм термічного розкладання дослідних зразків вказує на те, що кожний вид біомаси, має свою ширину температурного інтервалу, який визначається температурами початку та кінця стадії, а також температуру при якій процес протікає з максимальною швидкістю (табл. 1).

Таблиця 1

Температурні інтервали розкладання біомаси

Матеріал	Видалення вологи		Термічне розкладання			
	інтервал, °C	максимум, °C	Перший період		Другий період	
			інтервал, °C	максимум, °C	інтервал, °C	максимум, °C
Жом W=10%	23-192	138	192-425	351	425-800	535
Жом W=30%	23-212	112	212-429	351	429-770	505
Жом W=70%	24-230	150	230-428	351	428-836	513
Тирса W=10%	25-201	102	201-400	354	400-756	-
Солома W=10%	26-193	109	193-390	305	390-720	-
Соняшникове лушпиння W=7%	23-178	105	178-388	303	388-780	-

Аналіз дослідних даних вказує на те, що активне розкладання всіх зразків біомаси починається при температурах дещо вище 60°C . Перший етап термічного розкладання (прогрів частинки та видалення води) протікає в температурному інтервалі $23\text{--}230^{\circ}\text{C}$ для бурякового жому, $25\text{--}201^{\circ}\text{C}$ - для соснової тирси, $26\text{--}193^{\circ}\text{C}$ – для пшеничної соломи, $23\text{--}178^{\circ}\text{C}$ - для соняшникового лушпиння. При збільшенні початкової вологості дослідних зразків температурний інтервал стає більш ширшим і процес видалення води зсувається в бік вищих температур. Разом з тим, має місце суттєва різниця у значеннях похідної втрати маси, яка є показником значного зростання швидкості виходу води. За значеннями температурного максимуму швидкості зневоднення дослідні матеріали розміщуються в ряд: буряковий жом – пшенична солома – соняшникове лушпиння – соснова тирса. Найвища швидкість конверсії води для бурякового жому з початковою вологістю 10% становить 1.3 мг/хв , тоді як для такого ж зразка з початковою вологістю 70% - 7.65 мг/хв , що різниться більше, ніж у 5 разів (рис. 4).

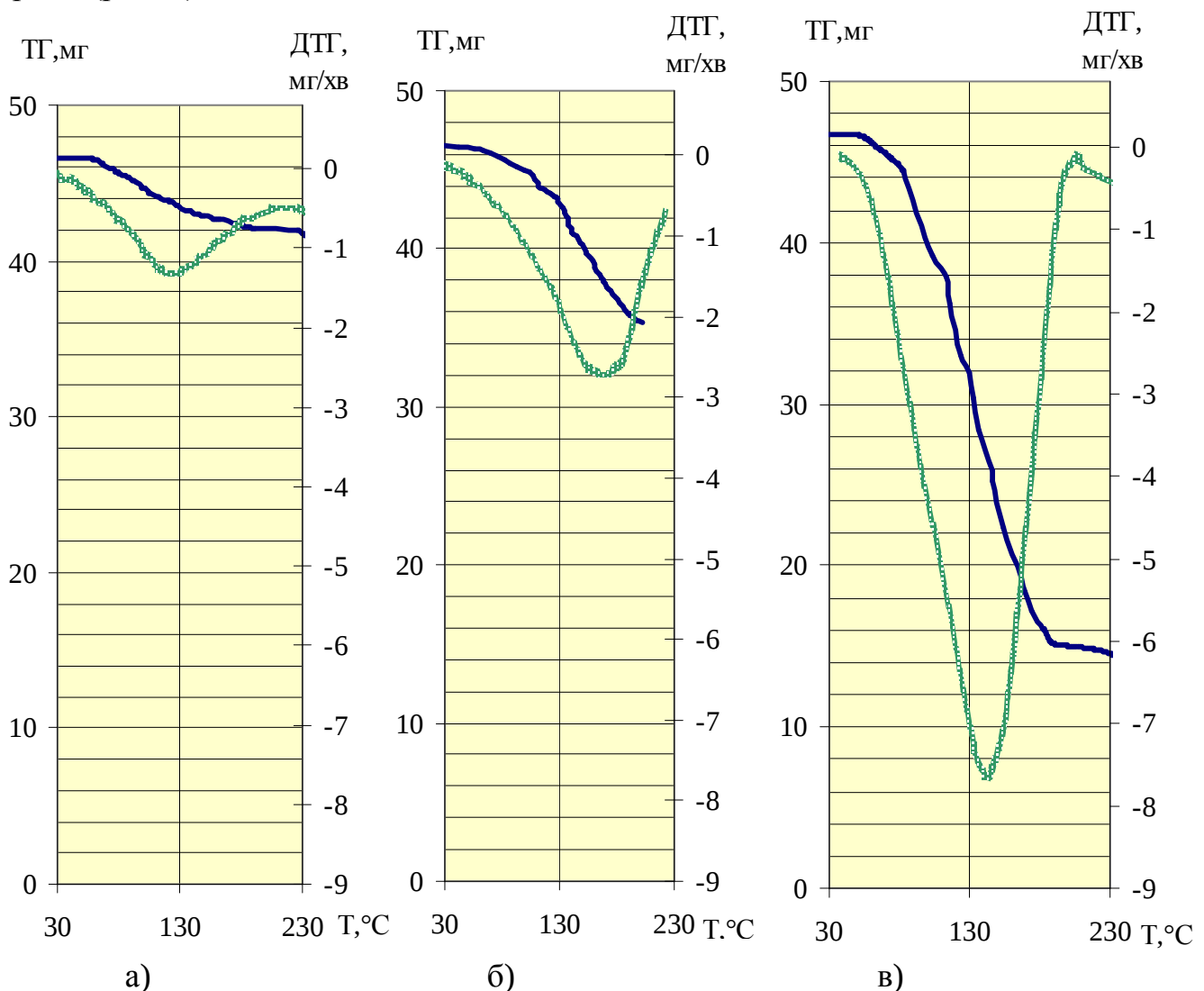


Рис. 4 Термогравітограми процесу зневоднення жому у співставних координатах:
а- жом $W=10\%$; б-жом $W=30\%$; в- жом $W=70\%$.

— ТГ — ДТГ

Максимальна швидкість для тирси, соломи та соняшникового лушпиння коливається в межах 20% і пояснюється тим, що мінеральна та органічна складова цих палив не однакова (рис. 5).

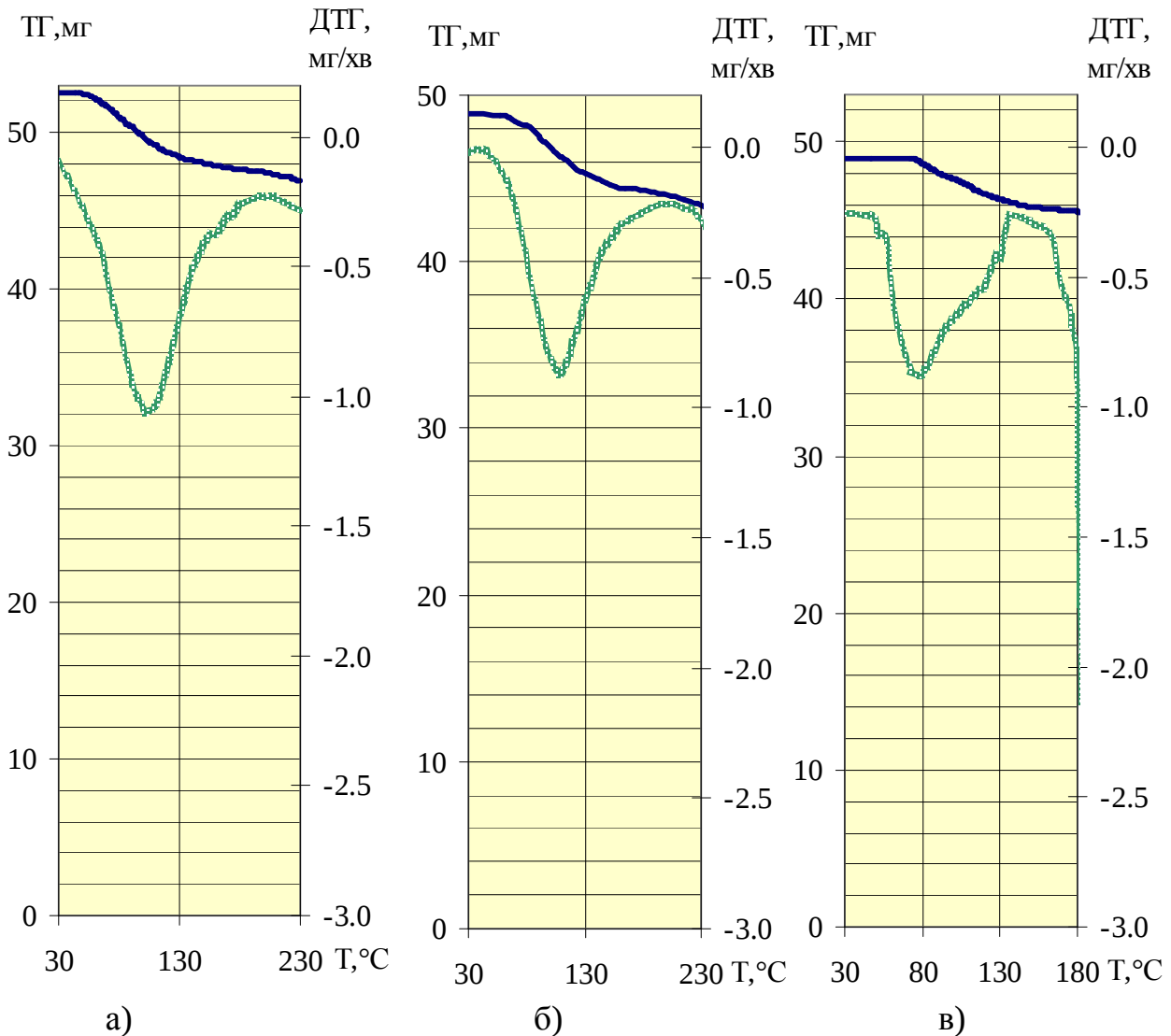


Рис. 5 Термогравітограми процесу зневоднення окремих типів біомаси у співставних координатах:

а- тирса $W=10\%$; б-солома $W=10\%$; в- соняшникове лушпиння $W=7\%$.

— ТГ - - - - - ДТГ

Враховуючи різноманітність наявних методів аналізу термогравіметричних даних, були проведені розрахунки передекспоненціального множника (A_W) та енергії активації (E) стадії зневоднення з використанням інтегрального методу Коутса-Редферна [Coats, A.W. Kinetic Parameters from Thermogravimetric Data [Текст] / A.W. Coats, J. P. Redfern // Nature. – 1964. – Vol. 201. – P.68-69] та диференційного методу з припущення щодо першого порядку реакції (табл. 2).

Для опису процесу видалення вологи було використано диференційне рівняння (6).

$$\frac{da}{dT} = \frac{A_W}{b} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \cdot (1-a) \quad (6)$$

Таблиця 2

Розрахункові значення енергії активації (E) та передекспоненціального множника (A_W) для стадії зневоднення

Тип біомаси	Метод розрахунку				Відхилення	
	диференційний		інтегральний		$\Delta E, \%$	$\Delta A_W, \%$
	E, Дж/моль	A_W , 1/с	E, Дж/моль	A_W , 1/с		
Буряковий жом:						
W=10%	27154	27,05	26584	27,73	2,10	2,452
W=30%	37105	840,17	36503	872,55	1,62	3,711
W=70%	48326	34683	48766	32411	0,90	6,551
Соснова тирса W=10%	24519	13,56	24614	12,39	0,386	8,628
Пшенична солома W=10%	25848	13,70	25968	13,97	0,462	1,933
Соняшникове лушпиння W=7%	38546	886,52	38920	902	0,961	1,716

Значення кінетичних показників стадії зневоднення для зразків бурякового жому з різною початковою вологістю можуть бути розраховані за формулами (7) та (8):

$$E = 13694 \cdot W^{0.2957}, \text{ кДж/моль} \quad (7)$$

$$\ln A_W = 0.8519 \cdot W^{0.5957}, \text{ 1/с} \quad (8)$$

Співставлення дослідних (точки) та розрахункових даних (суцільна лінія), одержаних за рівнянням (6), наведено на рис. 6-7.

Результати розрахункових досліджень показали, що для обох методів (див. табл. 2 та рис. 6-7) передекспоненціальний множник (A_W) та енергія активації (E) стадії зневоднення різняться щонайбільше на $\pm 9\%$, що дозволяє в подальшому використовувати ці значення для опису процесу зневоднення біомаси та при 3-d моделюванні процесів спалювання біомаси. Проте інтегральний метод є більш простим, оскільки не потребує визначення похідної від функції зміни маси у часі, дозволяє спростити розрахунок та скоротити тривалість обчислень за допомогою комп'ютерних програм.

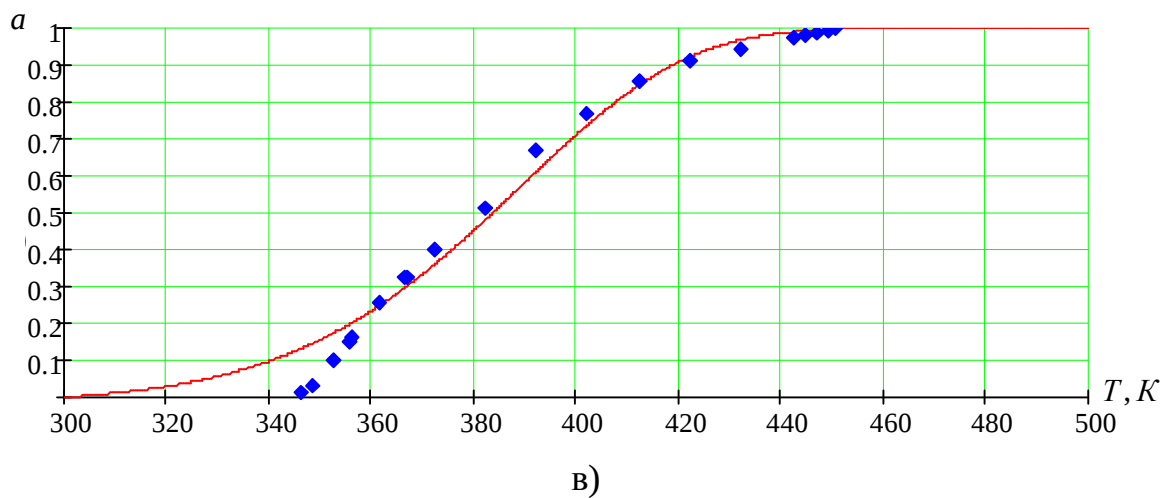
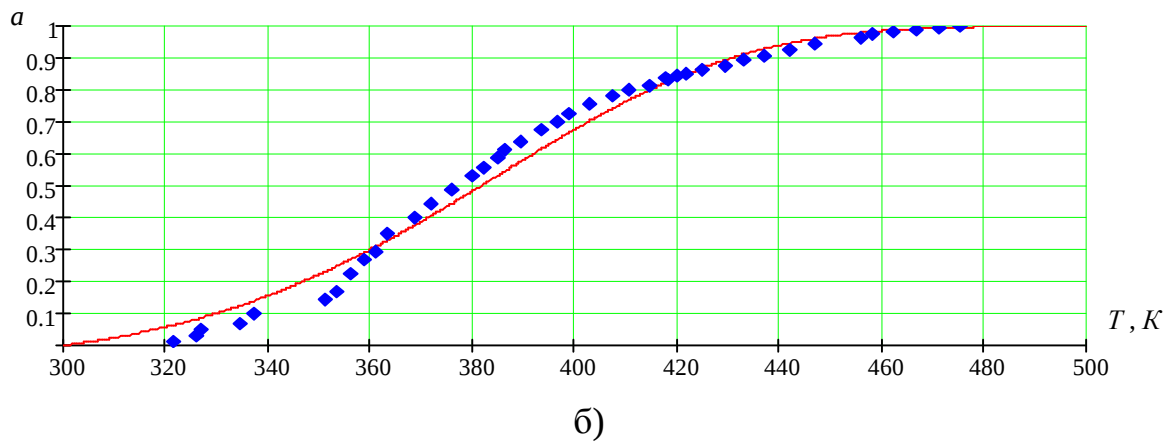
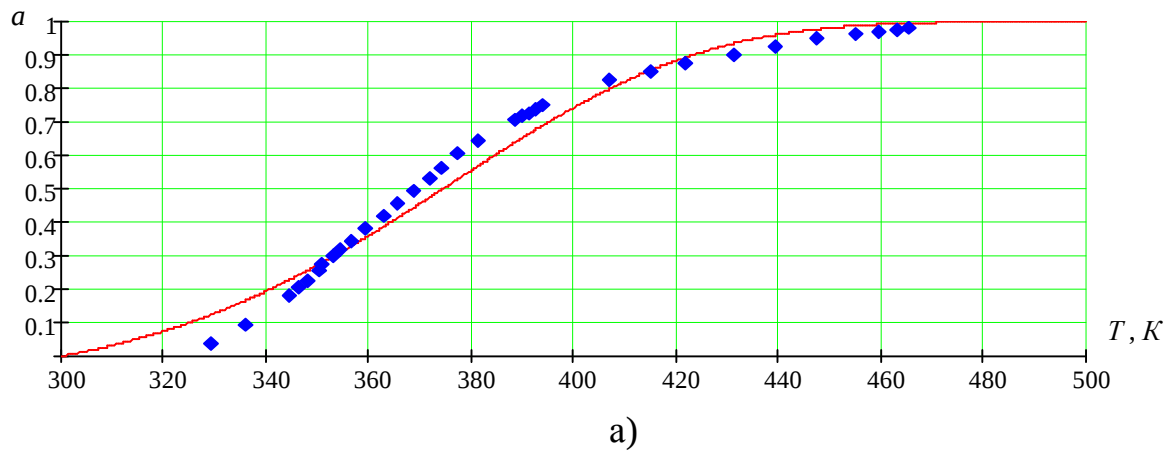


Рис. 6 Співставлення $\alpha=f(T)$ для стадії зневоднення, отриманих дослідним та розрахунковим шляхом:

а) тирса $W=10\%$, б) солома $W=10\%$, в) соняшникове лушпиння $W=7\%$.

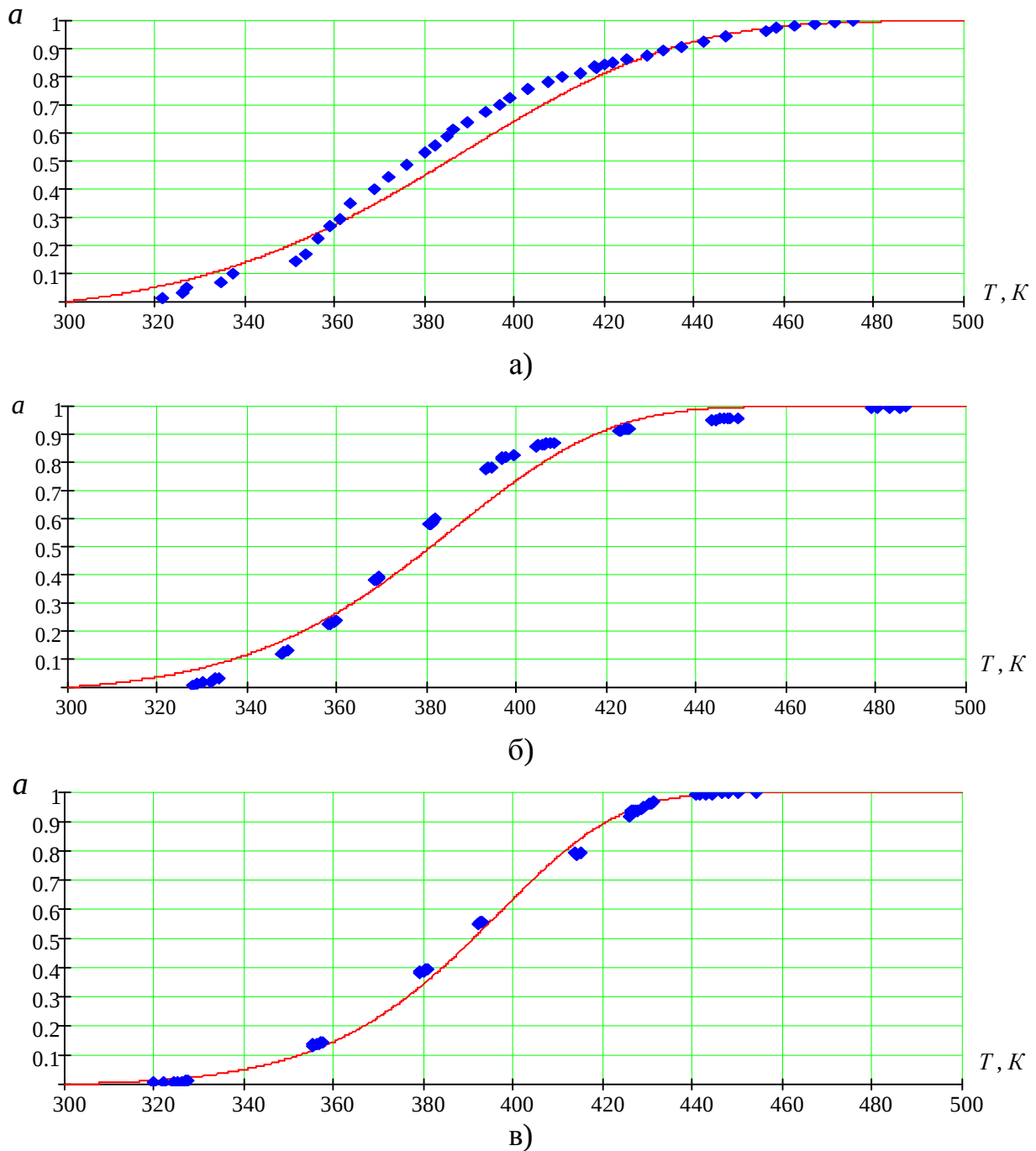


Рис. 7 Співставлення $\alpha=f(T)$ стадії зневоднення для бурякового жому, отриманих дослідним та розрахунковим шляхом: а) з початковою вологістю $W=10\%$; б) з початковою вологістю $W=30\%$; в) з початковою вологістю $W=70\%$.

Після видалення вологи подальше нагрівання зразків викликає збільшення швидкості реакції найменш стійких з'єднань біомаси, в результаті чого відбувається інтенсивний вихід летких речовин (рис 8).

Основний вихід летких з бурякового жому протікав в діапазоні 192-429°C, 201-400°C - для тирси, 193-390°C - для соломи, 178-388°C – для соняшникового лушпиння. ДТГ – криві дослідних зразків в цей період мали один чи два піки максимальної швидкості, що обумовлено різним компонентним складом дослідних біопалив. Біомаса є складним матеріалом головними складовими якого є геміцелюлоза, целюлоза та лігнін. Тому процес термічного розкладання біомаси можна розглядати через сумарну дію її головних компонентів (рис. 9).

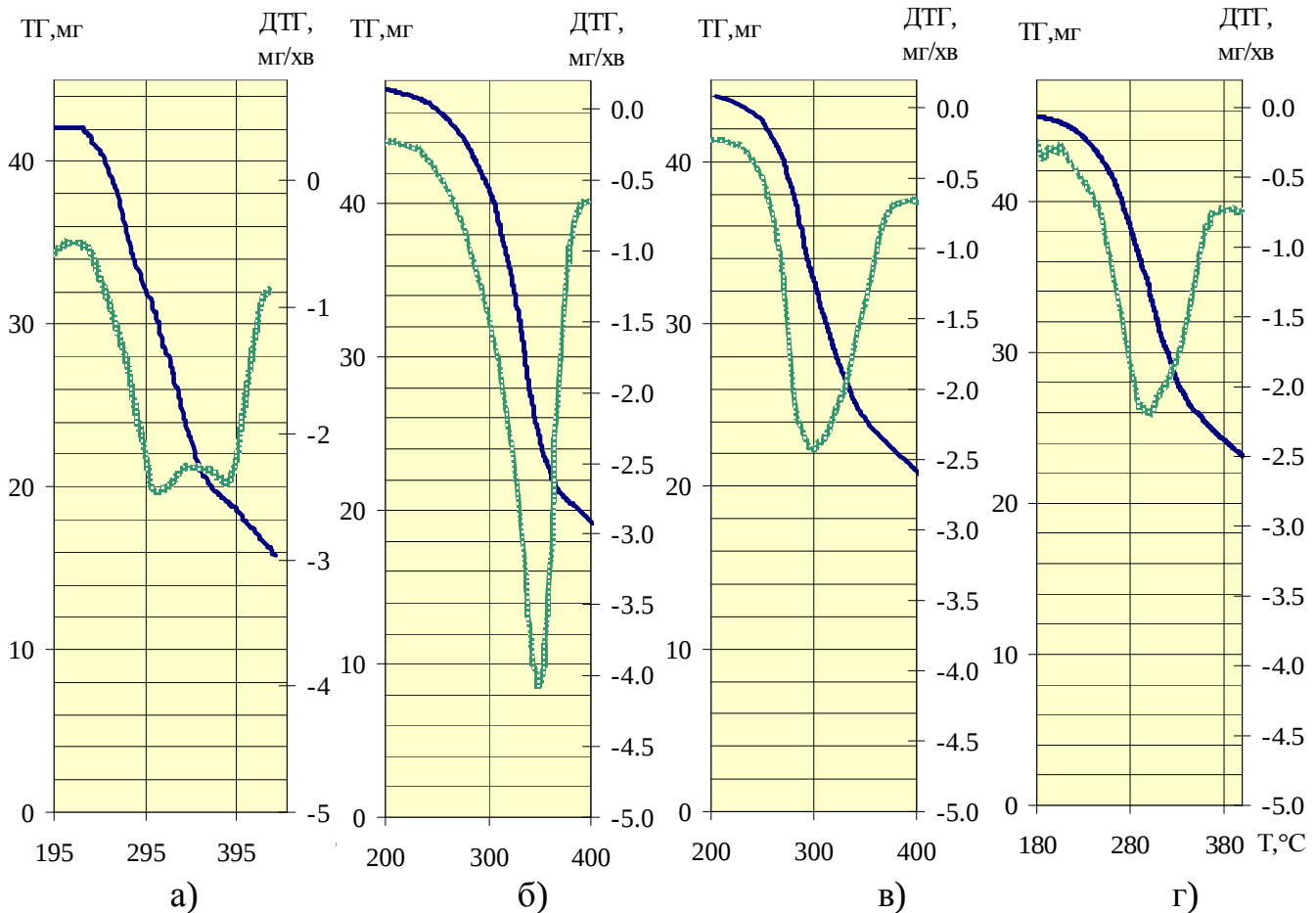


Рис. 8 Термогравітограми процесу виходу летких речовин з окремих типів біомаси у співставних координатах: а- буряковий жом; б- соснова тирса; в- пшенична солома; г- соняшникове лушпиння.

— ТГ ДТГ

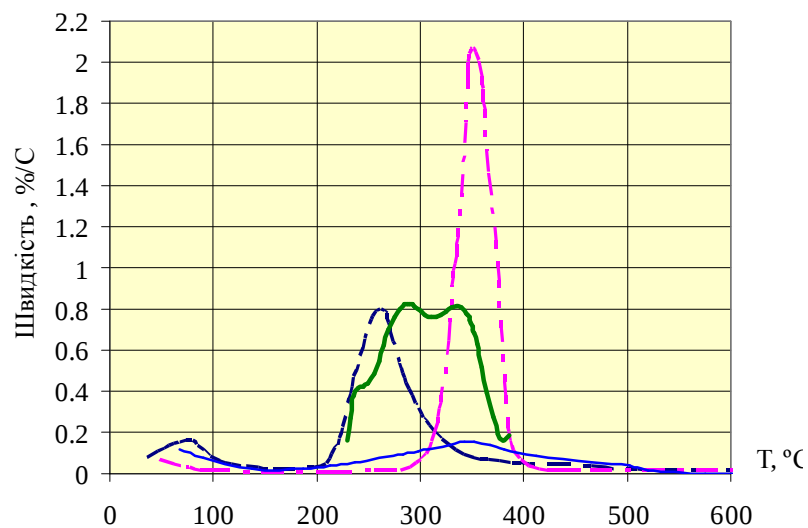


Рис. 9 Криві ДТГ для целюлози, геміцелюлози, лігніну [Heikkinen, J. M. Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation [Текст] / J. M. Heikkinen, J. C. Hordijk, W. de Jong, H. Spliethoff // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2004. – Vol. 71 (2). – P. 883- 900] і жому.

— геміцелюлоза - - - целюлоза — лігнін — жом

Перший пік ДТГ- кривої бурякового жому відповідає розкладанню геміцелюлози, а другий пік - розкладанню целюлози, які містяться у зразках. Одночасне розкладання всіх складових бурякового жому приводить до сумарного ефекту, максимальна швидкість якого досягається при 351 °С.

Кінетичні параметри виходу летких з дослідних зразків біомаси було визначено на основі ТГА даних та методики інтегрального методу Коутса-Редферна (табл. 3).

Таблиця 3

Розрахункові значення енергії активації (E_V) та передекспоненціального множника (A_V) для стадії виходу летких речовин

Тип біомаси	E_V , Дж/моль	A_V , 1/с
Буряковий жом	61440	1095
Соснова тирса	87373	164400
Пшенична солома	81923	92470
Соняшникове лушпиння	70746	8914

Для опису процесу виходу летких було використано диференційне рівняння (9):

$$\frac{da}{dT} = \frac{A_V}{b} \exp\left(\frac{-E_V}{RT}\right) \cdot (1 - a), \quad (9)$$

де A_V - передекспоненціальний множник стадії виходу летких речовин, 1/с; E_V - енергія активації стадії виходу летких речовин, Дж/моль.

Співставлення дослідних (точки) та розрахункових даних (суцільна лінія), одержаних за рівнянням (9), наведено на рис. 10.

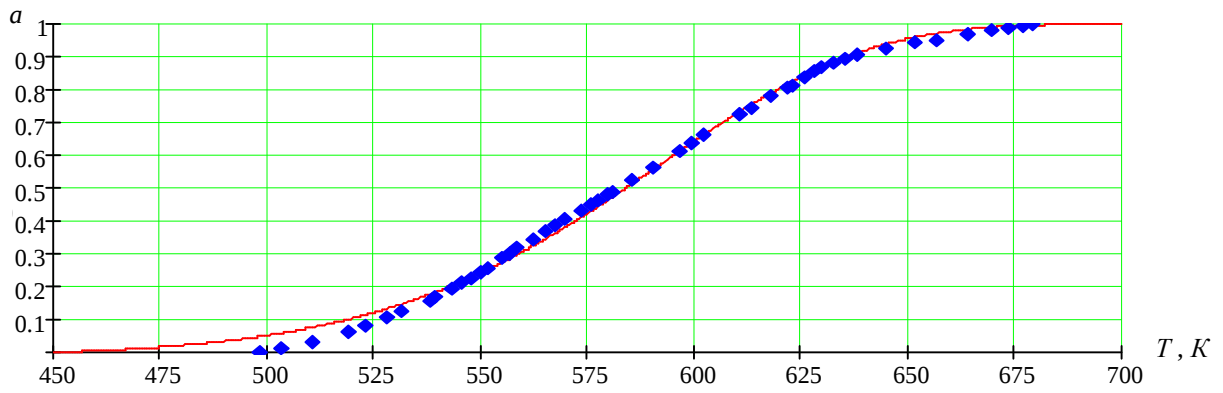
В якості математичного опису багатостадійного процесу термічної деструкції біопалива та формування розрахункової ТГ- кривої процесу використані наступні рівняння:

$$a_j = \frac{m_{0j} - m_{tj}}{m_{0j} - m_{kj}},$$

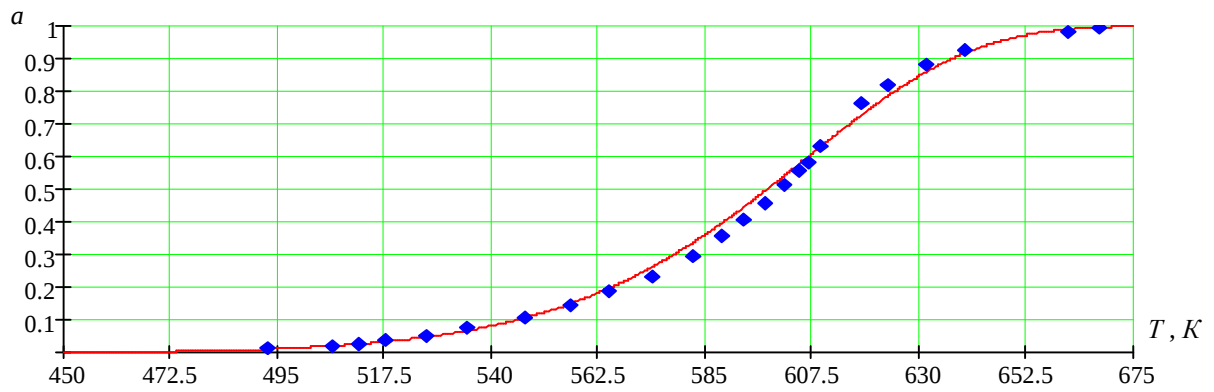
$$-\frac{da_j}{dT} = \frac{A_j}{b} \exp\left(\frac{-E_j}{RT}\right) \cdot a_j,$$

$$-\frac{dm}{dT} = \sum_{j=1}^N m_{0j} \cdot \frac{da_j}{dT}$$

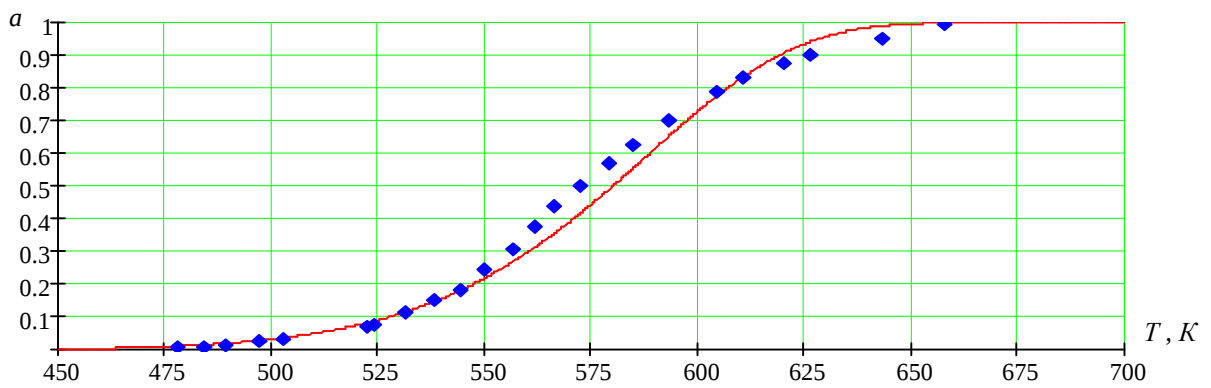
де m_{0j} – початкова маса зразка на j-ї стадії; m_{tj} – поточна маса зразка на j-ї стадії; m_{kj} – маса зразка після закінчення процесу на j-ї стадії, A_j – передекспоненціальний множник j-тої стадії перетворення, 1/с; E_j – енергія активації j-тої стадії перетворення, Дж/моль; j – індекс, що відповідає номеру стадії; N – кількість стадій.



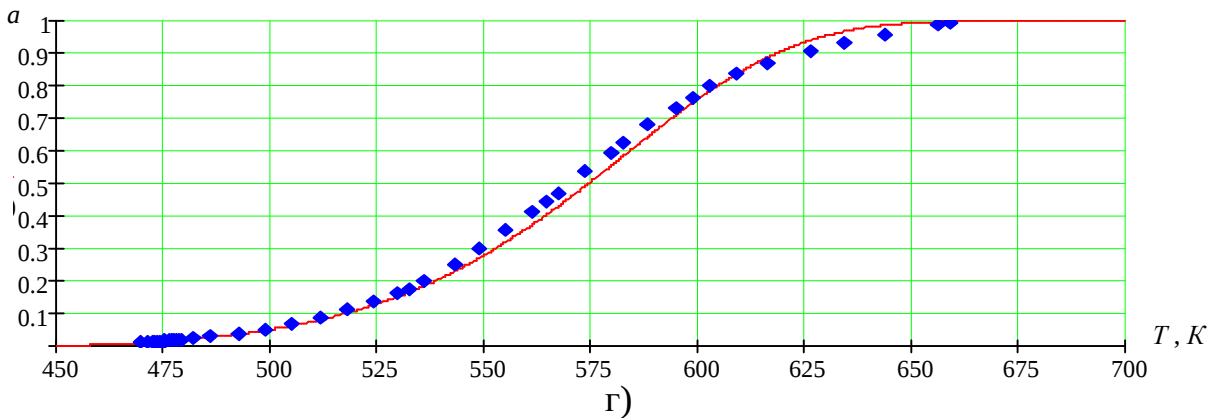
а)



б)



в)



г)

Рис. 10 Співставлення $\alpha=f(T)$ для стадії виходу летких, отриманих дослідним та розрахунковим шляхом: а) буряковий жом; б) соснова тирса; в) пшенична солома; г) соняшникове лушпиння.

Результати математичного моделювання $m=f(T)$ представлені у вигляді графічних залежностей (рис. 11), де точками зображені результати розрахунків, а суцільними лініями - результати експериментальних досліджень.

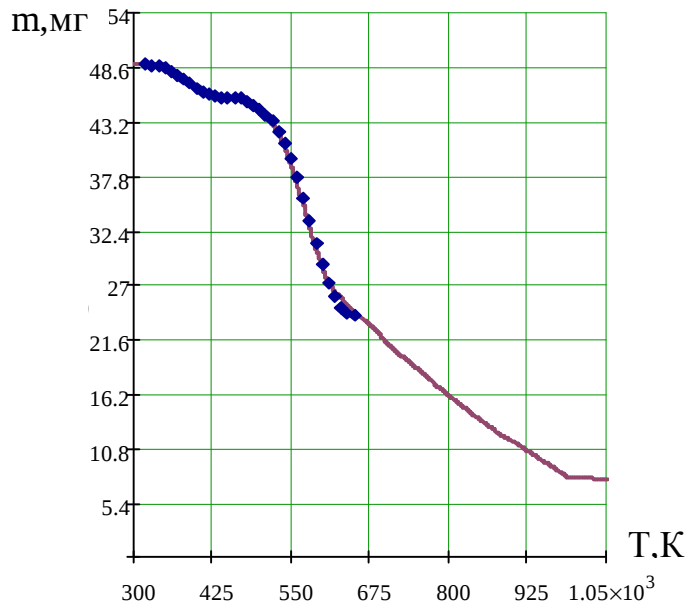
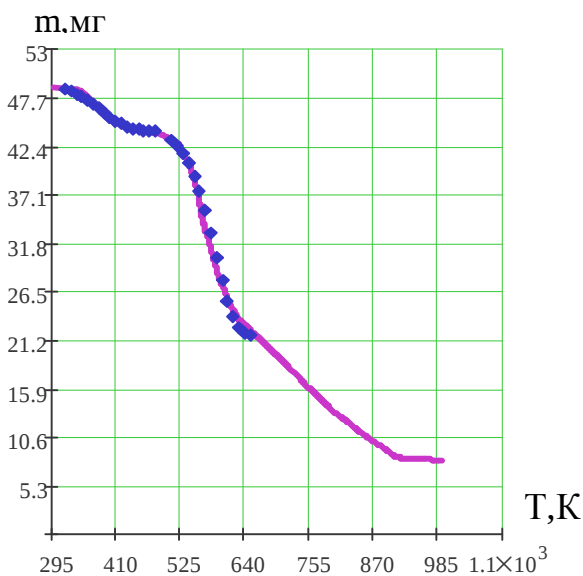
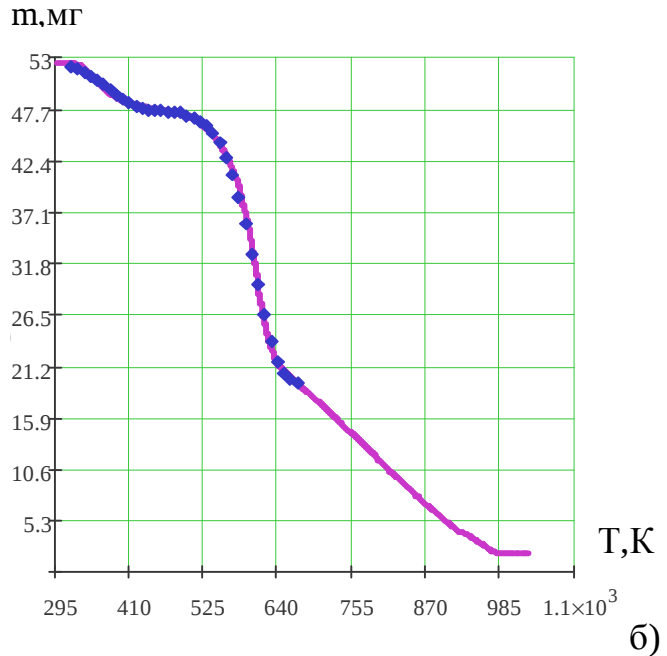
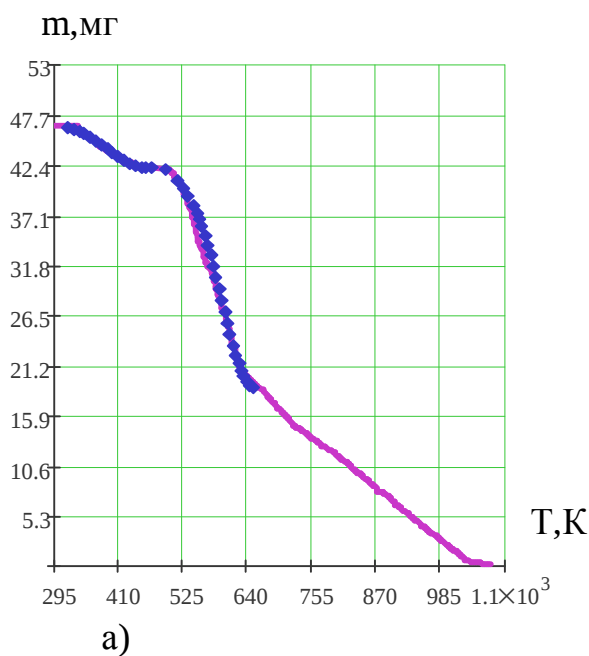


Рис. 11 Співставлення $m=f(T)$ для стадії виходу вологи та виходу летких, отриманих дослідним та розрахунковим шляхом: а) буряковий жом; б) соснова тирса; в) пшенична солома; г) соняшникове лущиння.

Практичні аспекти використання результатів.

Оскільки результати співставлення розрахунків за математичною моделлю (6) та (9) з експериментальними даними ТГА аналізу свідчать про їх відповідність, видається можливим використати отримані кінетичні характеристики для моделювання процесу прогріву та сушки біомаси, а також виходу летких речовин.

В основі моделювання прогріву паливної частинки прийнято метод Померанцева, який базується на моделі нагріву частинки в гріючому середовищі до інтенсивного виходу та горіння летких, проте вона враховує прогрів лише сухих частинок. Це видавалося обґрунтованим для вугілля $R_z=50$ мкм, натомість для вологої біомаси при $R_z=1-5$ мм процес сушки переноситься в камеру згорання.

Для розрахунку прогріву вологої частинки з урахуванням зневоднення палива використано систему диференціальних рівнянь (10) та (11).

$$\begin{cases} \frac{dT_q(t)}{dt} = \frac{a_k(T_z - T_q(t))}{m_q c_q} \cdot F_{нов} + \frac{s_0 a_q(T_z^4 - T_q(t)^4)}{m_q c_q} \cdot F_{нов} - \frac{\frac{dW(t)}{dt} \cdot r}{m_q c_q}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{dW(t)}{dt} = A_W \cdot \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T_q(t)}\right) \cdot (m_g - W(t)) \end{cases} \quad (11)$$

де m_g - маса води в частинці, кг; $W(t)$ - кількість виділеної води в момент часу t , кг; $T_q(t)$ - температура частинки в момент часу t , К; A_W - передекспоненціальний множник для процесу видалення води, s^{-1} ; E - енергія активації для процесу видалення води, Дж/моль; R - універсальна газова стала, Дж/моль·К; r - прихована теплота пароутворення, кДж/кг.

Результати чисельних розрахунків, проведених у програмі MathCad, наведено на рис. 12.

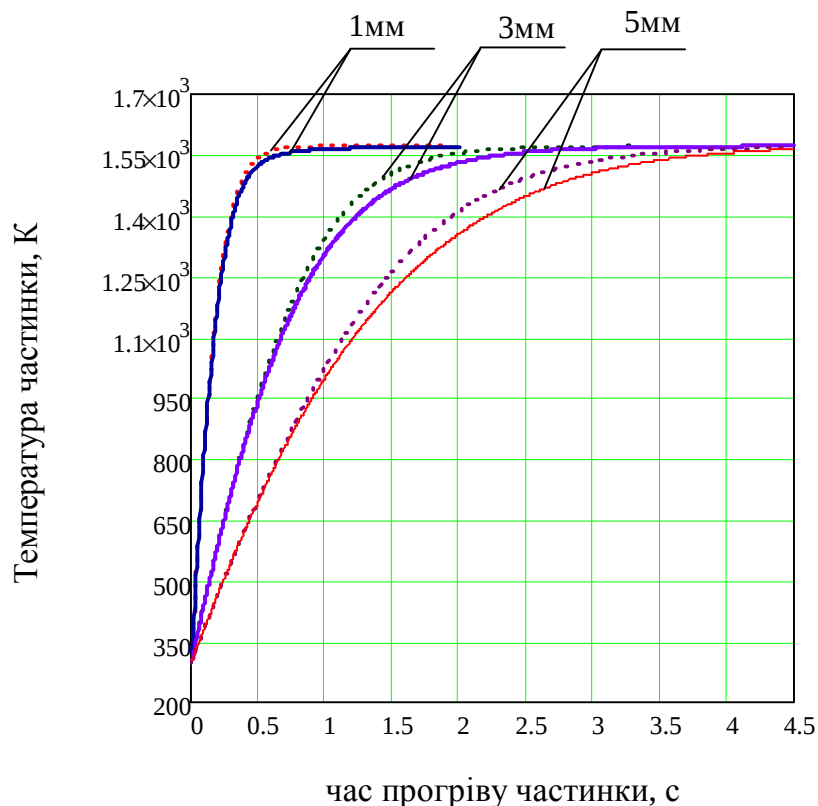


Рис. 12 Співставлення результатів розрахунку прогріву частинок деревини циліндричної форми різного помелу до температури 1473 К: (---) — за методикою Померанцева, (- - - -) — за методикою з урахуванням зневоднення палива.

Для розрахунку виходу летких речовин використано рівняння (12).

$$V = V_0 \cdot \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t A \cdot \exp(-E/RT(t)) \cdot dt \right] \right\} \quad (12)$$

Результати чисельних розрахунків тривалості виходу летких при високошвидкісному нагріві, проведених у програмі MathCad, наведено на рис. 13.

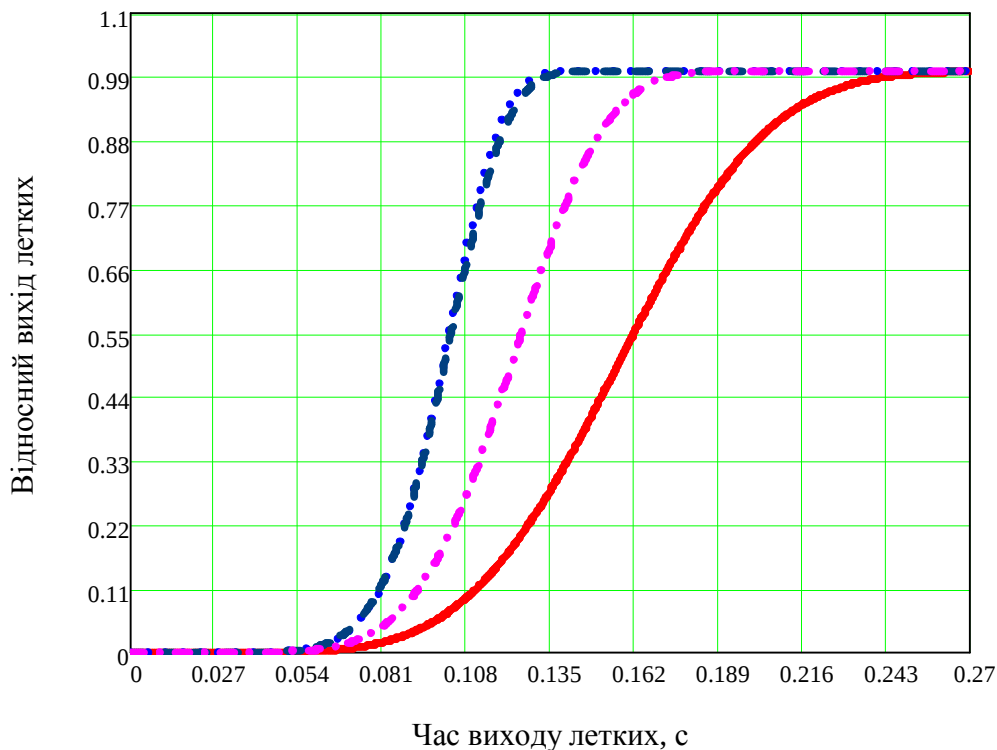


Рис. 13 Розрахунок тривалості стадії виходу летких з окремих видів біомаси:

- буряковий жом
- тирса
- соліма
- соняшникове лушпиння

Дослідження сумісного спалювання вугілля та біомаси на пілотному стенді.

Для виявлення можливостей заміщення „підсвіткового” природного газу біомасою на установці ВГП-100В (ІВЕ АН України) були проведені дослідження сумісного спалювання високозольного вугілля та бурякового жому (табл.4).

Як видно з табл.4 експериментальні режими поділяються на три групи: 1 - режим із підсвічування вугілля марки антрацит природним газом та буряковим жомом; 2 - режим спалювання жому з „підсвіткою” газом та 3 - режим спалювання вугілля з „підсвітковим” газом.

Порівняння профілю температур газів вздовж осі реактора (рис. 14) вказує на поліпшення умов горіння при частковій заміні „підсвічування” природним газом на „підсвічування” буряковим жомом. При спільному спалювання вугілля та бурякового жому температура факелу в першій секції значно менша ніж при спалюванні вугілля з „підсвітковим” газом. Таке зниження температури

обумовлено значними витратами тепла на випаровування води, яка міститься в біомасі, і підтверджено даними математичного моделювання.

Таблиця 4

**Характеристика експериментальних режимів дослідження ССБВ на
установці ВГП-100В ІВЕ АН України**

№	Витрати			Загальний надлишок повітря	Температура газів, °C				Результати газового аналізу, %				Частка по теплу, %			Сумарна теплова потужність, кВт	Час перебування, с
	газ, м ³ /год	вугілля, кг/год	жом, кг/год		секц.1	секц.2	секц.3	секц.4	CO	O ₂	CO ₂	N ₂	газ	жом	вугілля		
1	3,15	15,4	18,7	0,54	1036	1399	1437	1333	2,36	1,34	16,04	79,37	14,5	37,5	48,0	214,48	0,76
2	1,5	0	30,5	0,78	1031	1333	1340	1333	2,26	1,88	15,74	79,22	9,6	90,4	0	154,1	0,82
3	1,8	18,7	0,0	0,74	1340	1340	1330	1200	-	1,8	16,3	-	11,3	-	88,7	146,6	0,9

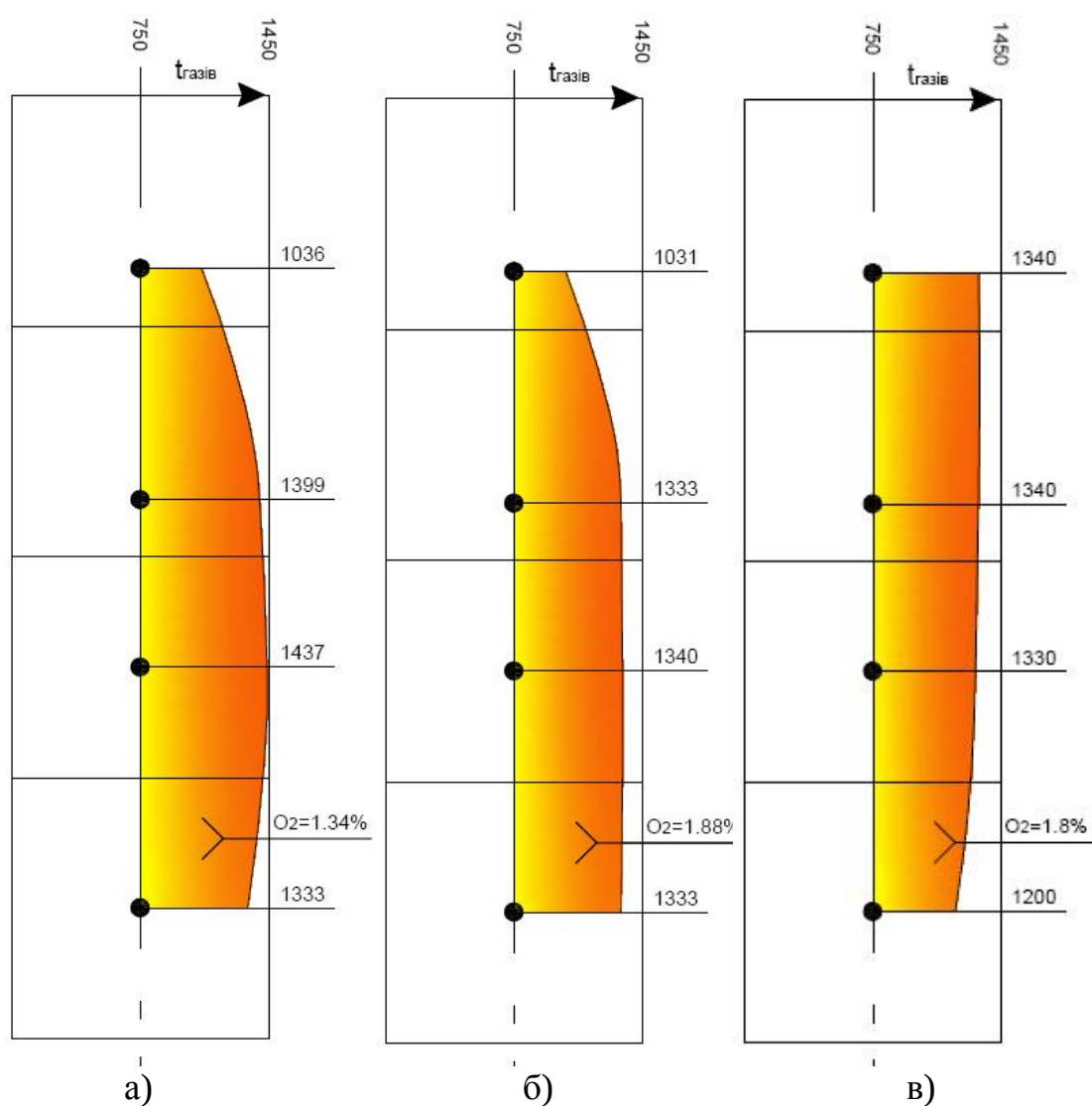


Рис. 14 Розподіл температур в реакторі (°C):
а – режим 1, б – режим 2, в – режим 3 (зольність вугілля Ad=27.9%).

Для побудови математичної моделі процесу термохімічного перетворення полідисперсного пилу, процес згорання палива слід розглядати як паралельне вигорання частинок різних фракцій в пилогазоповітряному потоці. Процес пофракційного горіння полідисперсного пилу в потоці може бути розрахований вирішенням системи диференціальних рівнянь кінетики зневоднення, виходу та горіння летких речовин, температури паливної частинки, які написані для кожної окремої фракції пилу, та теплового балансу горіння:

- кінетика випаровування води:

$$\frac{dW(t)}{dt} = k_{\text{вип.влаг}} \cdot (W_0 - W(t)),$$

де W_0 , $W(t)$, $(W_0 - W(t))$ - відповідно початковий вміст води в паливі, кількість води, яка виділилася за проміжок часу t та кількість води, яка міститься в паливі в момент часу t , кг/кг; $k_{\text{вип.влаг}} = A_W \cdot \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T_q(t)}\right)$ - константа швидкості виходу води, 1/с;

- кінетика виходу летких речовин:

$$\frac{dV_{\text{в.л.}}(t)}{dt} = k_{\text{в.л.}} \cdot (V_0 - V_{\text{в.л.}}(t))$$

де V_0 , $V_{\text{в.л.}}(t)$, $(V_0 - V_{\text{в.л.}}(t))$ - відповідно початковий вміст летких речовин в горючій масі палива, кількість летких, які виділилися за проміжок часу t та кількість летких, що містяться в паливі в момент часу t , кг/кг; $k_{\text{в.л.}}$ - константа швидкості виходу летких речовин, 1/с

- кінетика горіння летких речовин:

$$\frac{dV_{\text{з.л.}}(t)}{dt} = k_{\text{з.л.}} \cdot (V_{\text{в.л.}}(t) - V_{\text{з.л.}}(t))$$

де $V_{\text{з.л.}}(t)$, $(V_{\text{в.л.}}(t) - V_{\text{з.л.}}(t))$ - відповідно кількість летких, які згоріли за проміжок часу t та кількість летких, що містяться в газовому середовищі в момент часу t , кг/кг; $k_{\text{з.л.}}$ - константа швидкості горіння летких речовин, 1/с;

- температура паливної частинки на стадії прогріву:

$$\frac{dT_{qi}(t)}{dt} = \frac{a_K (T_{\text{д.з.}} - T_{qi}(t))}{m_{qi} c_q} \cdot F_{\text{нов}} + \frac{s_0 a_q (T_{\text{д.з.}}^4 - T_{qi}(t)^4)}{m_{qi} c_q} \cdot F_{\text{нов}} - \frac{\frac{dW_i(t)}{dt} \cdot r}{m_{qi} c_q},$$

де T_{qi} , m_{qi} - відповідно температура та маса частинок певної i -тої фракції; a_K - коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від димових газів до частинки; c_q - питома теплоємність частинки, кДж/кг К, $T_{\text{д.з.}}$ - температура потоку димових газів, К; $F_{\text{нов}}$ - сумарна поверхня частинки певної i -тої фракції, м²; s_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; a_q - ступінь чорноти частинки; r - питома теплота пароутворення, кДж/кг;

- рівняння теплового балансу горіння:

$$\begin{aligned}
 V_{\partial,2} c_{\partial,2} \frac{dT_{\partial,2}(t)}{dt} = & V_{\text{пов}\Sigma} \cdot c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} + V_{\text{CH}_4} \cdot c_{\text{газ}} \cdot t_{\text{газ}} + V_{\text{CH}_4} \cdot Q_{i(\text{CH}_4)}^r + \\
 & + G_{\text{жом}} \cdot \frac{dV_{2,л}(t)}{dt} \cdot Q_{2,л} + G_{\text{кокс}} \cdot X_C \cdot Q_{\text{кокс}} - G_{\text{жом}} \cdot c_{\text{жом}} \cdot (T_{\partial,2}(t) - T_{\text{сер.жом}}(t)) - \\
 & - G_{\text{жом}} \cdot \frac{dW(t)}{dt} \cdot r - G_{\text{жом}} \cdot \frac{dV_{6,л}(t)}{dt} \cdot Q_{\text{дестр}} - Q_{\text{втр}} - (V_{\text{CO}} \cdot Q_{i(\text{CO})}^r + V_{\text{H}_2} \cdot Q_{i(\text{H}_2)}^r) - \\
 & - (G_{\text{кокс}} \cdot (1 - X_C) \cdot c_{\text{кокс}} \cdot t_{\text{кокс}} + G_3 \cdot c_3 \cdot t_3)
 \end{aligned}$$

де $V_{\partial,2}$ – витрата димових газів, м³/сек; $c_{\partial,2}$ – середня теплоємність газоподібних продуктів при $T_{\partial,2}$, кДж/(м³·К); $T_{\partial,2}(t)$ – температура димових газів у певний момент часу, К; $c_{\text{пов}}, c_{\text{газ}}$ – ізобарні теплоємності відповідно повітря та метану, кДж/(м³·°С); $t_{\text{пов}}, t_{\text{газ}}$ – початкові температури відповідно повітря та метану, °С; $G_{\text{жом}}$ – витрата біомаси, кг/сек; $Q_{2,л}, Q_{\text{кокс}}$ – теплота згорання відповідно летких речовин та вуглецю, кДж/кг; $c_{\text{жом}}$ – ізобарна теплоємність біопалива, кДж/(кг·К); $T_{\text{сер.жом}}(t) = \frac{\sum T_i(t) \cdot n_i \cdot m_i}{\sum n_i \cdot m_i}$ – середньо-масова температуру палива, К;

$Q_{\text{дестр}}$ – тепло, яке витрачається на термічну деструкцію палива, кДж/кг; $Q_{\text{втр}}$ – теплові втрати за рахунок конвективного та променевого теплообміну з приміщенням, кВт; $V_{\text{CO}}, V_{\text{H}_2}$ – витрати горючих компонентів на виході, розраховані за виразом: $V_i = V_{\text{пов}} \cdot 0,781 \cdot n_i / n_{\text{N}_2}$, нм³/сек; $Q_{i(\text{CO})}^r, Q_{i(\text{H}_2)}^r$ – нижча теплота згорання СО та Н₂ відповідно; G_3 – витрата золи, кг/сек; c_3 – середня теплоємність золи на виході, кДж/(кг·°С); t_3 – температура золи на виході, °С.

За вказаною моделлю було опрацьовано експериментальні дані, які були отримані під час дослідів на установці ВГП-100В для режиму 2 (рис. 15, табл. 5).

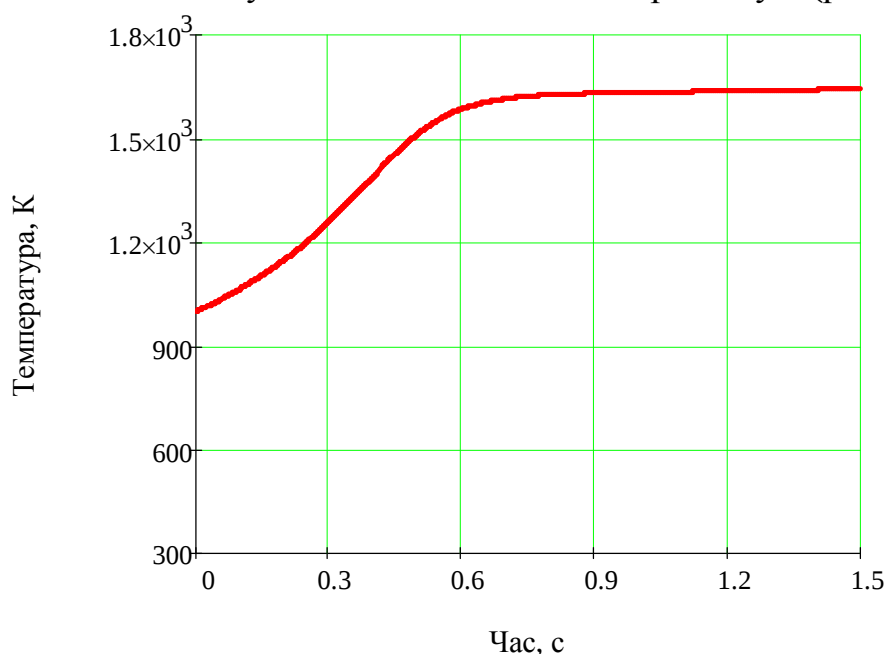


Рис. 15 Графік зміни температури димових газів в реакторі.

**Співставлення розрахункових та експериментальних даних процесу
термічної деструкції бурякового жому в потоці продуктів спалювання
природного газу**

Джерело даних	Витрати			Температура газів, °С			
	газ, нм ³ /год	вугілля, кг/год	жом, кг/год	секція 1	секція 2	секція 3	секція 4
експеримент	1,5	0	30,5	1031	1333	1340	1333
розрахунок	1,5	0	30,5	981	1230	1342	1359

ВИСНОВКИ

1. Проведено дослідження окремих стадій термічної деструкції деяких видів біомаси (бурякового жому, соснової тирси, пшеничної соломи та соняшникового лушпиння) із застосуванням ТГА - методів.

2. Розроблено методику апроксимації похідних від функції зміни маси у часі на основі яких проведено співставлення інтегральних та диференціальних методів обробки даних. Обґрунтовано еквівалентність цих методів у застосуванні до стадії зневоднення.

3. За даними термогравіметричного аналізу було визначено температурні інтервали та кінетичні характеристики окремих стадій розкладання біопалива, які можуть бути використані для визначення оптимальних умов енерготехнологічної переробки біомаси на стадії його розробки, а також для оптимального автоматичного керування обладнанням під час експлуатації.

4. Вперше отримано експериментальні дані з кінетичних параметрів стадії зневоднення біомаси, які були застосовані для моделювання процесів спалювання вологої біомаси як індивідуального виду палива, так і у суміші з вугіллям.

5. Отримано дані з виходу летких речовин, у тому числі вперше для бурякового жому.

6. На основі кінетичних характеристик біомаси і математичного моделювання розроблено модель процесів прогріву вологої паливної частинки та виходу летких речовин, яка дозволяє визначати температуру частинки, кількість видаленої вологи та летких в часі, а також тривалість окремих етапів термічної деструкції. При цьому модель дозволяє врахувати відносний рух частинок палива.

7. Проведено експериментальне дослідження сумісного спалювання бурякового жому та вугілля на пілотному стенді ВГП-100В (ІВЕ АН України). За результатами встановлена можливість спільного факельного спалювання бурякового жому з вітчизняним антрацитом. При цьому значний вміст летких біомаси дозволяє суттєво знизити витрату „підсвіткового” газу для стабілізації факелу та покращити якість горіння низькореакційного антрациту.

8. Розроблену математичну модель стадії зневоднення та виходу летких речовин було застосовано при розрахунках температурного режиму процесу спалювання на пілотному стенді ВГП-100В (ІВЕ АН України). Застосування

вказаної моделі дозволяє адекватно розрахувати температури на окремих секціях установки, врахувати стадійну витрату теплоти на зневоднення біомаси та деструкцію хімічних зв'язків.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Засядько Я. І. Моделювання процесу зневоднення біомаси на основі ТГА дослідження / Я. І. Засядько, М. М. Мирошник, Н. І. Дунаєвська, П. Я. Засядько // Відновлювана енергетика. – 2012. – № 1 (28). – С. 85-95.
2. Засядько Я. І. Термогравіметричні дослідження бурякового жому / Я. І. Засядько, М. М. Мирошник, П. Я. Засядько // Цукор України. – 2012. – № 2 (74). – С. 29-32.
3. Мирошник М. М. Дослідження кінетики виходу летких з бурякового жому на основі термогравіметричного аналізу / М. М. Мирошник, Я. І. Засядько, П. Я. Засядько // Цукор України. – 2012. – № 4 (76). – С. 22-26.
4. Засядько Я.І. Перспективи використання біомаси для отримання теплової енергії в Україні / Я. І. Засядько, М. М. Мирошник // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету – №8. – 2011. – С. 78-82.
5. Мирошник М. М. Біомаса - альтернативне джерело енергії / М. М. Мирошник, Я. І. Засядько // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті : 75-та наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 13-14 квітня 2009 р. : програма і матеріали конф. – К. : НУХТ, 2009. – Ч. 3. – С. 323.
6. Мирошник М. М. Використання біомаси як джерела теплової енергії в Україні / М. М. Мирошник, Я. І. Засядько // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті : 76-та наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 12-13 квітня 2010 р. : програма і матеріали конф. – К. : НУХТ, 2010. – Ч. 3. – С. 57.
7. Мирошник М. М. Дослідження теплотехнічних характеристик біомаси / М. М. Мирошник, Я. І. Засядько // Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодення та перспективи: Міжнар. наук.-практ. конф., 27-28 вересня 2010 р. : програма і матеріали конф. – К. : НУХТ, 2010. – Ч. 2. – С. 11.
8. Мирошник М. М. Дослідження кінетики реакцій термічного розкладу біомаси / М. М. Мирошник, Я. І. Засядько // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті : 77-а наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 11-12 квітня 2011 р. : програма і матеріали конф. – К. : НУХТ, 2011. – Ч. 2. – С. 120-121.

АНОТАЦІЯ

Мирошник М. М. Кінетика термічної деструкції окремих видів біомаси як альтернативного палива. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика – Національний університет харчових технологій, Київ, 2013.

Дисертація присвячена дослідженню процесів термохімічного перетворення окремих видів твердої біомаси як альтернативного палива для факельного спалювання у промислових енергетичних установках.

Проведено експериментальні дослідження процесу термічної деструкції окремих видів твердої біомаси та розраховано кінетичні константи рівняння Арреніуса для процесу зневоднення та виходу летких із застосуванням ТГА.

Розроблено математичну модель стадії видалення вологи та виходу летких речовин з біомаси на основі рівняння Арреніуса з порядком реакції $n=1$.

Показано, що модель узагальнює експериментальні дані з достатньою точністю, і може використовуватись при 3-d моделюванні спалювання біомаси.

Розроблено методики розрахунку стадії прогріву та зневоднення вологої паливної частинки, виходу летких речовин з біомаси.

Проведено дослід з факельного спалювання твердої біомаси як індивідуального виду палива, так і в суміші з вітчизняним низькорекційним антрацитом. Підтверджена можливість заміщення „підсвіткового” природного газу біомасою.

Розроблено математичну модель стадії прогріву, зневоднення та виходу летких речовин у застосуванні до процесу спалювання на пілотному стенді ВГП-100В (ІВЕ АН України).

Ключові слова: біомаса, термогравіметричний аналіз (ТГА), енергія активації, передекспоненціальний множник, кінетика, математична модель.

АННОТАЦИЯ

Мирошник М. Н. Кинетика термической деструкции отдельных видов биомассы как альтернативного топлива. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук за специальностью 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика – Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2013.

Диссертация посвящена исследованию процессов термохимического превращения отдельных видов твердой биомассы как альтернативного топлива для факельного сжигания в промышленных энергетических установках.

Проведены экспериментальные исследования процесса термической деструкции отдельных видов твердой биомассы и рассчитаны кинетические константы уравнения Аррениуса для процесса обезвоживания и выхода летучих с применением ТГА.

Разработана математическая модель стадии удаления влаги и выхода летучих веществ из биомассы на основе уравнения Аррениуса с порядком реакции $n=1$.

Показано, что модель обобщает экспериментальные данные с достаточной точностью, и может использоваться при 3-d моделировании сжигания биомассы.

Разработаны методики расчета стадии прогрева и обезвоживания влажной топливной частицы, выхода летучих веществ с биомассы.

Проведены опыты факельного сжигания твердой биомассы, как индивидуального вида топлива, так и в смеси с отечественным

низкорреакционным антрацитом. Подтверждена возможность замещения „подсветочного” природного газа биомассой.

Разработана математическая модель стадии прогрева, обезвоживания и выхода летучих веществ в применении к процессу сжигания на пилотном стенде ВГП-100В (ИУЭ АН Украины).

Ключевые слова: биомасса, термогравиметрический анализ (ТГА), энергия активации, предэкспоненциальный множитель, кинетика, математическая модель.

THE SUMMARY

M. M. Myroshnik. Kinetics of thermal destruction of some types of biomass as alternative fuel. – Manuscript.

Dissertation submitted for a scientific degree of candidate of technical sciences on the specialty 05.14.06 – Technical thermo physic industrial heat-and-power engineering. – National University of Food Technologies, Kyiv, 2013.

Dissertation is dedicated to the study of thermo-chemical decomposition of some biomass types as alternative fuel for pulverized combustion in furnaces of power plant boilers.

The experimental research of thermal degradation some types of solid biomass has been carried out.

TGA method and experimental unit were employed. Experimental data thus obtained were digitalized and processed by means of application of the integral and differential methods. A set of kinetic coefficients for the Arrhenius Equation of the reaction first order were obtained valid within the temperature range characteristic for the preliminary stage of combustion process, namely – biomass demineralization and devolatilization.

A mathematical model, which allows calculation of the stages named above duration, biomass particles change due to the moisture evaporation and volatiles yield, biomass heating up time rate, determination of total mass of volatiles yield, heat balances of the processes has been developed.

The model has been validated by the experimental data obtained as well as by the data available in literature.

It has been shown that the results calculated by the model correspond to experimental data with an accuracy $\pm 9\%$, and can be used directly for description of water evaporation processes and volatiles yield. It can also be used as a sub-model of biomass combustion as a single fuel and co-combustion with pulverized coal.

The process of biomass pulverized combustion as an alternative fuel and co-firing of biomass with coal in the pilot experimental stand VGP-100 has been studied. The prospect of natural gas substitution by biomass fuel for the flame stabilization has been proven.

The mathematical model of heating and water evaporation, devolatilization was developed in application to the pulverized combustion on the pilot stand of VGP-100.

Key words: biomass, thermo-gravimetric analysis (TGA), activation energy, pre-exponential factor, kinetic, mathematical model.