УДК 662.6/.9:536.46:544.4
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).25

COMPARATIVE ANALYSIS OF KINETIC METHODS FOR THERMAL CONVERSION OF COAL-SOLID BIOMASS BLENDS

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КІНЕТИЧНИХ МЕТОДІВ ТЕРМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СУМІШЕЙ ВУГІЛЛЯ І ТВЕРДОЇ БІОМАСИ

Valentyn O. Dzhezhulei
valentindjejylej@gmail.com
ORCID: 0009-0002-5354-5613

В. О. Джежулей,
аспірант

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Abstract. The article provides a comparative analysis of kinetic methods used to describe thermal conversion of coal-solid biomass fuel blends. *Purpose*. To compare the applicability of the Starink, Coats–Redfern, and Ozawa–Flynn–Wall methods for determining the kinetic characteristics of such blends based on data from recent thermogravimetric studies. *Method*. The methodological framework combines systemic, thermokinetic, comparative, calculation-analytical and empirical-synthetic approaches. The empirical basis includes published TGA/DTG studies of blends involving coal, anthracite, coal slime, semi-coke, Salix, bamboo, eucalyptus, pine sawdust and other solid biomass types. *Results*. The study substantiates that thermal conversion of such blends cannot be adequately described by a single averaged activation energy, because dehydration, volatile release, biomass organic matrix decomposition, coal thermal degradation and char-ash residue burnout partly overlap in different temperature ranges. It is shown that the Starink and Ozawa-Flynn-Wall methods are suitable for isoconversional analysis of $E(\alpha)$, whereas the Coats-Redfern method is useful for model-based interpretation of individual stages provided that the integral reaction function $g(\alpha)$ is selected carefully. Using the coal–Salix system as an empirical example, the article summarizes data showing that an increase in biomass content from 0 to 30 % decreases the ignition temperature from 444 to 393 °C and reduces the Coats–Redfern activation energy from 86.94 to 25.38 kJ/mol. An additional verification comparison of published isoconversional estimates for a coal–corn straw blend showed that $E\alpha$ obtained by the Ozawa–Flynn–Wall method decreases from 126.65 to 81.27 kJ/mol within $\alpha = 0.60–0.95$. *Scientific novelty*. A methodological approach to the integrated application of the Starink, Coats–Redfern, and Ozawa–Flynn–Wall methods for analysing the thermal conversion of coal–solid biomass blends has been substantiated. Unlike their isolated application, the proposed approach makes it possible to determine the applicability limits of each method and improve the reliability of interpreting kinetic characteristics at different stages of the thermal conversion process. *Practical importance*. The practical significance of the study lies in defining the applicability limits of the compared methods for the engineering description of the thermal conversion stages of fuel blends in thermal power engineering calculations.
Key words: thermal conversion; thermal decomposition; kinetic model; coal; solid biomass; co-combustion; pyrolysis; thermogravimetric analysis; Coats-Redfern method; Starink method; Ozawa-Flynn-Wall method; activation energy.

Анотація. У статті виконано порівняльний аналіз кінетичних методів, що застосовуються для опису термічного перетворення паливних сумішей вугілля і твердої біомаси. *Мета*. Зіставлення можливостей методів Старінка, Коутса–Редферна та Озави–Флінна–Волла для визначення кінетичних характеристик таких сумішей за даними сучасних термогравіметричних досліджень. *Методика*. Методологічну основу становить поєднання системного, термокінетичного, порівняльного, розрахунково-аналітичного та емпірично-узагальнювального підходів. Емпіричну базу сформовано за опублікованими ТГА/ДТГ-дослідженнями сумішей вугілля, антрациту, вугільного шламу, напівкоксу, вербової біомаси (Salix spp.), бамбука, евкаліпта, соснової тирси та інших видів твердої біомаси. *Результати*. Обґрунтовано, що термічне перетворення таких сумішей не може коректно описуватися одним усередненим значенням енергії активації, оскільки дегідратація, вихід летких речовин, розкладання органічної матриці біомаси, термічна деструкція вугілля та вигоряння коксозольного залишку частково накладаються в різних температурних інтервалах. Показано, що методи Старінка та Озави–Флінна–Волла доцільні для ізоконверсійного аналізу залежності $E(\alpha)$, тоді як метод Коутса–Редферна придатний для модельної інтерпретації окремих стадій за обґрунтованого вибору інтегральної функції $g(\alpha)$. На прикладі системи «вугілля + вербова біомаса (Salix)» узагальнено дані за якими збільшення частки біомаси від 0 до 30 % знижує темпера-

туру займання з 444 до 393 °С, а енергію активації за методом Коутса–Редферна – з 86,94 до 25,38 кДж/моль. Додаткове контрольне зіставлення ізоконверсійних оцінок для суміші вугілля і кукурудзяної соломи показало зміну Eα за методом Озави–Флінна–Волла зі 126,65 до 81,27 кДж/моль у діапазоні α = 0,60–0,95. *Наукова новизна*. Обґрунтовано методичний підхід до комплексного застосування методів Старінка, Коутса–Редферна та Озави–Флінна–Волла для аналізу термічного перетворення сумішей вугілля і твердої біомаси, що на відміну від їх ізольованого використання, дає змогу визначити межі застосування кожного методу та підвищити достовірність інтерпретації кінетичних характеристик на різних стадіях процесу. *Практична значимість*. Практична значимість статті полягає у визначенні меж застосування порівнюваних методів для інженерного опису стадій термічного перетворення паливних сумішей у теплоенергетичних розрахунках.

Ключові слова: термічне перетворення; термічне розкладання; кінетична модель; вугілля; тверда біомаса; спільне спалювання; піроліз; термогравіметричний аналіз; метод Коутса–Редферна; метод Старінка; метод Озави–Флінна–Волла; енергія активації.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Термічне перетворення паливних сумішей вугілля і твердої біомаси є одним із напрямів модернізації теплоенергетики, оскільки дає змогу частково замінювати викопне паливо відновлюваною сировиною з використанням адаптованої вугільної інфраструктури. Для котлів, пальникових пристроїв і топкових камер важливими є не лише елементний склад суміші або нижча теплота згоряння палива, а й динаміка нагрівання, дегідратації, виходу летких речовин, займання, горіння та перетворення вуглецевого залишку. У теплоенергетичних розрахунках ці процеси потребують кінетичних параметрів, придатних для опису окремих стадій і подальшого використання в моделях горіння, газифікації або піролізу [1; 2].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проблема ускладнюється тим, що суміші вугілля і твердої біомаси не поводяться як проста лінійна комбінація двох палив. Біомаса зазвичай має вищий вміст летких речовин і нижчу температуру активного розкладу, тоді як вугілля, особливо антрацит або низькореакційні марки, характеризується більшою часткою фіксованого вуглецю, повільнішим вигорянням та іншою мінеральною складовою. Тому в одній ТГА/ДТГ-картині можуть накладатися дегідратація, розклад геміцелюлози, целюлози та лігніну, термічне перетворення вугільної органічної маси і подальше перетворення або вигоряння коксового залишку залежно від атмосфери досліду. За таких умов вибір кінетичної моделі є не технічною формальністю, а методичною передумовою достовірного інженерного висновку.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасних дослідженнях паливних сумішей застосовуються як модельні, так і ізоконверсійні підходи. Метод Коутса–Редферна є інтегральним модельно-апроксимаційним методом, який дає змогу оцінити енергію активації та передекспоненційний множник за прийнятої інтегральної функції механізму реакції [3]. Методи Озави–Флінна–Волла і Старінка належать до ізоконверсійних методів, у яких енергія активації визначається для фіксованого ступеня перетворення за даними кількох швидкостей нагрівання [4–6]. Для сумішей вугілля і біомаси принципова різниця між цими підходами полягає в тому, що ізоконверсійні методи відображають зміну $E(\alpha)$ на різних ділянках процесу, тоді як метод Коутса–Редферна дає змогу перевіряти припущення щодо кінетичної моделі окремої стадії.

До того ж, актуальність статті визначається потребою не в ізольованому описі кожного методу, а в їхньому зіставленні для систем вугілля і твердої біомаси. У таких системах середнє значення енергії активації може приховувати накладання стадій, синергетичні ефекти, зміну механізму реакції та різну роль біомаси на ранньому й пізньому етапах термічного перетворення. Тому, порівняльний аналіз методів Старінка, Коутса–Редферна та Озави–Флінна–Волла має практичне значення для оцінювання займання, стабільності горіння, вибору частки біомаси і побудови спрощених кінетичних підмоделей для теплоенергетичних розрахунків.

Класична основа неізотермічного кінетичного аналізу твердих палив сформувалася навколо термогравіметричних даних, у яких втрата маси зразка переводиться у ступінь перетворення α, а температурна залежність швидкості реакції описується рівнянням Арреніуса. Coats і Redfern запропонували інтегральну апроксимацію, що стала одним із найуживаніших підходів для оброблення ТГА-кривих у твердотільній кінетиці [3]. Методи Ozawa та Flynn–Wall сформували основу безмодельного ізоконверсійного підходу, відомого як метод Озави–Флінна–Волла, у межах якого енергія активації визначається за зміщенням температури, що відповідає однаковому ступеню перетворення, за різних швидкостей нагрівання [4;5]. М. Старінк систематизував ізоконверсійні методи, проаналізував похибки апроксимацій температурного інтеграла і запропонував рівняння, яке використовується поряд із методами Озави–Флінна–Волла та Кіссінджера–Акахіри–Суносе в дослідженнях піролізу, горіння і термічного розкладання матеріалів [6].

Методологічні рекомендації ICTAC наголошують, що кінетичні параметри, отримані з термоаналітичних даних, не можна тлумачити як універсальні константи без урахування якості експериментальних даних, температурної програми, швидкості нагрівання, діапазону ступеня перетворення, атмосфери досліду та прийнятої моделі реакції [7]. Для сумішей вугілля і біомаси це застереження має особливе значення, оскільки відмінність у реакційній здатності компонентів зумовлює зміну ефективної енергії активації протягом процесу. Коректний аналіз має розрізняти методи, що апроксимують окрему прийняту модель стадії, і методи, що дають змогу простежити зміну $E(\alpha)$ без попереднього вибору механізму. Для ізоконверсійного аналізу бажано використовувати дані щонайменше за трьох швидкостей нагрівання, оскільки одинарна ТГА-крива не дає підстав для побудови $E(\alpha)$.

Окремий масив досліджень присвячений паливним властивостям і кінетиці сумішей вугілля з твердою біомасою. Для українського контексту важливою є робота Н. Дунаєвської, Я. Засядька і Т. Щудла, у якій досліджено термічну деструкцію біомаси як окремого палива та в сумішах із низькореакційним антрацитовим вугіллям Донбасу методом неізотермічного ТГА. Автори розділяють стадії дегідратації, виходу летких речовин і вигоряння коксового залишку; для ділянок дегідратації та виходу летких речовин прийнятним визначено критерій $E/RT > 4$, тоді як для коксового залишку доцільнішою виявилася апроксимація Сенума–Янга [1], що формує прикладну рамку для використання кінетичних констант в інженерних розрахунках пальникових пристроїв, топкових камер і тривимірних моделей горіння.

Сучасні роботи зміщують акцент від загального підтвердження придатності спільного спалювання до кількісного аналізу синергетичних ефектів і відмінностей між методами розрахунку енергії активації. У дослідженні суміші вугілля і Salix показано, що збільшення частки біомаси знижує температуру займання з 444 до 393 °C, а енергію активації за методом Коутса–Редферна для серії за 10 K/хв – з 86,94 кДж/моль для чистого вугілля до 25,38 кДж/моль для суміші з 30 % біомаси [8]. Водночас синергетичний ефект не є монотонним: 15 % біомаси посилюють горіння в інтервалі 400–530 °C, тоді як 30 % у цьому самому діапазоні можуть мати інгібувальний ефект [8]. Отже, зниження середньої енергії активації не тотожне однозначному поліпшенню всіх стадій термічного перетворення.

Інші емпіричні праці розширюють цю логіку. Дослідження спільного спалювання вугільного шламу і moso bamboo поєднує ТГА, TG-FTIR, PCA, ANN, KAS, FWO, метод Старінка і метод Коутса–Редферна, що засвідчує перехід до багатометодного аналізу паливних сумішей [10]. У роботі щодо спільного спалювання кількох видів вугілля з евкаліптом основну увагу приділено взаємодії компонентів, кінетичному аналізу і зміні ефективної енергії активації [9]. Дослідження ко-піролізу вугілля з біомасою показує, що синергетичний ефект залежить від частки біомаси і стадії процесу: при 25 % біомаси фіксується позитивна синергія, тоді як при 50 % – негативна; TG-FTIR-аналіз додатково дає змогу пов'язати кінетику з еволюцією газових продуктів [11]. Композитні палива на основі антрациту і соснової тирси демонструють ще складніший випадок: механохімічна активація може формувати неадитивну поведінку, за якої композит відрізняється від простої фізичної суміші за термічним розкладанням, займанням, горінням і газифікацією [14].

Узагальнення літератури дає підстави виокремити дослідницьку прогалину. Більшість сучасних праць досліджує конкретну паливну систему або застосовує кілька кінетичних методів без достатнього пояснення того, як різні математичні підходи змінюють інтерпретацію термічного перетворення. Недостатньо артикульованим залишається питання, коли для систем вугілля і твердої біомаси доцільно використовувати ізоконверсійні методи Старінка та Озави–Флінна–Волла, а коли – метод Коутса–Редферна як модельно-апроксимаційний підхід. Порівняння методів дає змогу визначити, які кінетичні характеристики можуть бути використані в теплоенергетичних розрахунках.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є порівняння методів Старінка, Коутса–Редферна та Озави–Флінна–Волла для визначення кінетичних характеристик термічного перетворення паливних сумішей вугілля і твердої біомаси на основі сучасних термогравіметричних досліджень та визначення меж їх застосування в теплоенергетичних розрахунках.

Для досягнення поставленої мети вирішуються чотири завдання. Перше – систематизувати фізико-хімічні стадії термічного перетворення сумішей вугілля і твердої біомаси. Друге – порівняти математичну логіку методів Старінка, Коутса–Редферна та Озави–Флінна–Волла. Третє – узагальнити емпіричні дані сучасних ТГА/ДТГ-досліджень щодо енергії активації, температури займання, температури вигоряння та синергетичних ефектів. Четверте – визначити, який тип методу є доцільнішим для оцінювання зміни $E(\alpha)$, а який – для модельного опису окремих стадій термічного перетворення.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом даного дослідження є неізотермічний процес термічного перетворення (піролізу, горіння, газифікації та спільного спалювання) гетерогенних паливних сумішей, сформованих на основі викопного

вугілля різних марок (включаючи антрацити, низькореакційне вугілля, бітумінозне вугілля та вугільні шлами) і твердої біомаси (зокрема верби Salix, бамбука moso, евкаліпта, кукурудзяної соломи, соснової тирси, лушпиння соняшнику та шкаралупи волоського горіха), що характеризується багатостадійністю, накладанням реакційних інтервалів, зміною швидкостей нагрівання та проявом нелінійних синергетичних ефектів між компонентами.

В свою чергу, предметом дослідження є математико-методичні закономірності визначення макрокінетичних характеристик (ефективної енергії активації, передекспоненційного множника та функцій реакційного механізму) зазначених паливних сумішей на основі порівняльного аналізу інтегрального модельно-апроксимаційного методу Коутса–Редферна та безмодельних ізоконверсійних методів Озави–Флінна–Волла і Старінка, а також встановлення меж їхньої аналітичної достовірності та методологічної доцільності для використання у теплоенергетичних розрахунках.

Дослідження побудовано на вторинному аналізі опублікованих термогравіметричних робіт, у яких вивчено піроліз, горіння або спільне спалювання вугілля, антрациту, вугільного шламу, напівкоксу, твердої біомаси та їхніх сумішей. Основними емпіричними матеріалами є результати ТГА/ДТГ-досліджень паливних систем «вугілля + вербова біомаса (*Salix*)», «антрацит + тверда біомаса», «вугільний шлам + moso bamboo», «вугілля + евкаліпт», «антрацит + соснова тирса», а також роботи з біомасної кінетики, необхідні для пояснення поведінки біомасного компонента [1; 8–16].

Математична база дослідження спирається на загальне рівняння неізотермічного твердотільного перетворення. Ступінь перетворення визначається як $\alpha = (m_0 - m_T)/(m_0 - m_f)$, де m_0 – початкова маса зразка, m_T – маса при температурі T, m_f – кінцева маса після завершення відповідної стадії. За сталої швидкості нагрівання $\beta = dT/dt$ рівняння швидкості можна подати у формі $d\alpha/dT = (A/\beta)\exp(-E/RT)f(\alpha)$, де A – передекспоненційний множник, E – енергія активації, R – універсальна газова стала, $f(\alpha)$ – диференційна функція механізму реакції. У кінетичних рівняннях температура T використовується в K.

Метод Коутса–Редферна застосовується як інтегральний метод після переходу до $g(\alpha) = \int_0 \alpha d\alpha / f(\alpha)$. Його лінійна форма може бути записана як $\ln[g(\alpha)/T^2] = \ln[(AR)/(\beta E)(1 - 2RT/E)] - E/(RT)$, а за умови $E/(RT) \gg 1$ – як $\ln[g(\alpha)/T^2] \approx \ln[AR/(\beta E)] - E/(RT)$. Енергія активації визначається за нахилом прямої в координатах $\ln[g(\alpha)/T^2] - 1/T$, який дорівнює $-E/R$ [3]. Для моделі першого порядку $f(\alpha) = 1 - \alpha$, а інтегральна функція має вигляд $g(\alpha) = -\ln(1 - \alpha)$. Вибір $g(\alpha)$ має перевірятися не лише за коефіцієнтом детермінації, а й за фізичною відповідністю стадії, стабільністю параметрів і характером залишків лінійної апроксимації.

Метод Озави–Флінна–Волла використовує залежність температури $T\alpha$, що відповідає фіксованому ступеню перетворення α, від швидкості нагрівання β. Типова форма рівняння має вигляд $\log\beta = \log[AE/(Rg(\alpha))] - 2{,}315 - 0{,}4567E/(RT\alpha)$, тому нахил прямої $\log\beta - 1/T\alpha$ становить $-0{,}4567E/R$ [4; 5]. Запис із $\log\beta$ використовує десятковий логарифм і наближення температурного інтеграла Дойла. Метод Старінка записується як $\ln(\beta/T\alpha^{1{,}92}) = C - 1{,}0008E/(RT\alpha)$, де нахил прямої $\ln(\beta/T\alpha^{1{,}92}) - 1/T\alpha$ дорівнює $-1{,}0008E/R$ [6]. На відміну від попереднього рівняння, тут використовується натуральний логарифм. Обидва методи потребують даних за кількох швидкостей нагрівання, бажано не менше трьох, і не вимагають попереднього вибору моделі реакції.

Для кількісної ілюстрації використано відкриті дані дослідження спільного спалювання вугілля і *Salix*, де наведено температуру займання *Ti*, температуру вигоряння *Tb*, індекси горіння та кінетичні параметри за методом Коутса–Редферна для сумішей із часткою біомаси 0–30 % і для чистої біомаси [8]. Додатково виконано авторські розрахунки відносного зниження енергії активації та температури займання за формулою $\Delta X = (X_0 - Xi)/X_0 \times 100\ \%$, де X_0 – значення для чистого вугілля, Xi – значення для відповідної суміші. Для перевірки ізоконверсійної логіки використано опубліковані числові дані Wang та ін. щодо енергії активації та коефіцієнтів детермінації, розрахованих методами Озави–Флінна–Волла і Кіссінджера–Акахіри–Суносе для суміші вугілля і кукурудзяної соломи в діапазоні $\alpha = 0{,}60–0{,}95$ [12].

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ ТА ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Термічне перетворення сумішей вугілля і твердої біомаси має багатостадійний характер. На першій стадії відбувається видалення фізично зв'язаної вологи; на другій – вихід і займання летких речовин біомаси, пов'язаних із розкладанням геміцелюлози, целюлози та частини лігніну; на третій – термічне перетворення органічної маси вугілля і взаємодія летких продуктів; на четвертій – вигоряння коксового або коксозольного залишку в окиснювальному середовищі. Межі між цими стадіями не є жорсткими, тому одна ТГА/ДТГ-крива може містити кілька накладених процесів. Для кінетичного моделювання це означає, що єдина лінійна апроксимація на всьому інтервалі $\alpha = 0{,}2–0{,}8$ може бути придатною для інженерного узагальнення, але не завжди відображає реальний механізм окремих стадій.

Порівнювані методи виконують різні аналітичні функції. Метод Коутса–Редферна вимагає вибору $g(\alpha)$, тобто припущення про реакційний механізм, і тому краще працює тоді, коли дослідник виділяє відносно

Таблиця 1. Порівняння методів визначення кінетичних характеристик термічного перетворення паливних сумішей

Метод	Тип підходу	Математична основа	Переваги й обмеження для систем вугілля і твердої біомаси
Метод Коутса–Редферна	Інтегральний модельно-апроксимаційний метод	$\ln[g(\alpha)/T^2] \approx \ln[AR/(\beta E)] - E/(RT)$, за умови $E/(RT) \gg 1$; E визначається за нахилом $-E/R$	Дає змогу оцінити E, A і перевірити прийняту інтегральну функцію $g(\alpha)$; придатний для окремих температурних стадій. Результат залежить від вибору механізму, меж температурного інтервалу й припущення про однорідність процесу
Метод Озави–Флінна–Волла	Безмодельний ізоконверсійний метод	$\log\beta = C - 0{,}4567E/(RT\alpha)$; використовується десятковий логарифм; для кожного α потрібні $T\alpha$ за кількох β	Показує $E(\alpha)$ без попереднього вибору $g(\alpha)$; корисний для складних сумішей із накладанням стадій. Потребує кількох швидкостей нагрівання, бажано не менше трьох, і дає ефективну, а не механістично унікальну E
Метод Старінка	Безмодельний ізоконверсійний метод з уточненою апроксимацією температурного інтеграла	$\ln(\beta/T\alpha^{1,92}) = C - 1{,}0008E/(RT\alpha)$; використовується натуральний логарифм	Зручний для зіставлення з методом Озави–Флінна–Волла та методом Кіссінджера–Акахіри–Суносе; добре відображає зміну $E(\alpha)$. Точність залежить від якості визначення $T\alpha$ і узгодженості ТГА-кривих.
Комбіноване застосування	Методична стратегія для складних палив	Метод Озави–Флінна–Волла та метод Старінка → профіль $E(\alpha)$; метод Коутса–Редферна → модельна інтерпретація окремої стадії	Дає стійкішу інтерпретацію: ізоконверсійні методи показують зміну кінетики протягом процесу, а метод Коутса–Редферна допомагає описати окремі температурні ділянки за обраною моделлю

Джерело: складено автором на основі [3–7].

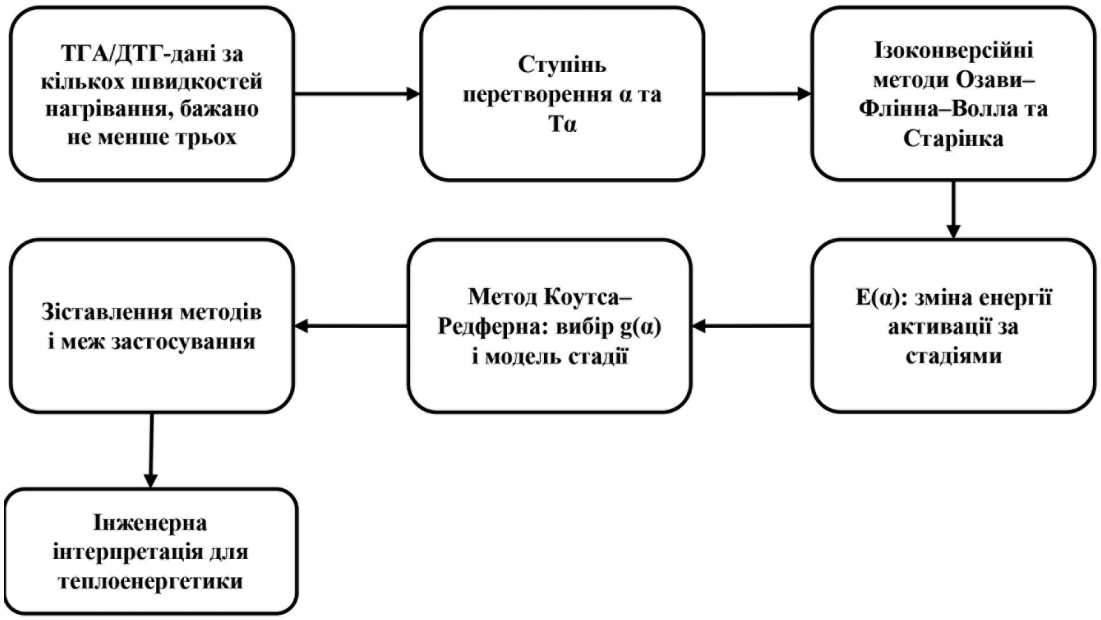


Рис. 1. Порівняльне застосування методів Старінка, Озави–Флінна–Волла та Коутса–Редферна до ТГА-даних паливних сумішей

Джерело: побудовано автором на основі [3–7].

однорідну температурну стадію. Методи Старінка та Озави–Флінна–Волла не потребують вибору механізму, але вимагають ТГА-кривих за кількох швидкостей нагрівання. Їхня перевага для сумішей вугілля і біомаси полягає в можливості простежити зміну $E(\alpha)$, що є критичним для систем із накладанням розкладання біомаси, термічного перетворення вугільного компонента та вигоряння вуглецевого залишку.

Методи, наведені в табл. 1, не є взаємозамінними. Якщо дослідник має лише одну криву нагрівання і приймає конкретну реакційну модель, метод Коутса–Редферна дає практичну можливість отримати E та A для обраної стадії. Якщо мета полягає у виявленні зміни кінетичної складності процесу зі зростанням α, перевагу мають методи Старінка та Озави–Флінна–Волла. Для паливних сумішей доцільно не протиставляти ці підходи, а використовувати їх послідовно: спочатку встановити зміну E(α), а потім перевірити, які температурні ділянки можна обґрунтовано описати моделлю Коутса–Редферна. Узагальнену логіку застосування методів подано на рис. 1.

Емпіричні дослідження останніх років підтверджують, що головний предмет аналізу зміщується від опису окремого палива до оцінювання взаємодії компонентів у суміші. Для теплоенергетики це важливо, оскільки додавання біомаси може полегшувати займання і зменшувати середню енергію активації, але водночас змінювати зольність, газовиділення, мінеральні взаємодії та інтервал стабільного горіння. Узагальнення сучасних робіт наведено в табл. 2.

Дані табл. 2 підтверджують три загальні тенденції. По-перше, у сучасних роботах дедалі частіше виокремлюється синергетичний ефект, тобто відхилення реальної поведінки суміші від розрахункової суми поведінки окремих компонентів. По-друге, зростає частота поєднання ТГА з TG-FTIR, PCA, ANN або іншими методами аналізу, що дозволяє пояснювати не тільки втрату маси, а й зміну газових продуктів та механізмів реакції. По-третє, для інтерпретації кінетичних параметрів доцільно використовувати кілька методів одночасно, оскільки E, отримана з однієї моделі, не описує всіх стадій складної суміші.

Таблиця 2. Емпіричні дослідження термічного перетворення та спільного спалювання систем вугілля і твердої біомаси

Джерело	Паливна система	Експериментальна база	Методи кінетичного аналізу	Ключовий висновок для статті
Дунаєвська та ін., 2018 [1]	Антрацит Донбасу + тверда біомаса	Неізотермічний ТГА, повітряне середовище, 20 °C/хв, 25–1000 °C	Інтегральні апроксимації; метод Коутса–Редферна; апроксимація Сенума–Янга	Потрібне розділення стадій дегідратації, виходу летких речовин і вигоряння коксового залишку; кінетичні константи можуть використовуватися в інженерних розрахунках
Ma та ін., 2025 [8]	Вугілля + Salix	ТГА/ДТГ/ДСК; частка біомаси 0–30 % і 100 %; окиснювальне середовище 79 % N_2 / 21 % O_2	Метод Коутса–Редферна	Додавання вербової біомаси (*Salix*) знижує *Ti* з 444 до 393 °C і *E* з 86,94 до 25,38 кДж/моль для суміші з 30 % біомаси за 10 K/хв, але синергетичний ефект залежить від температурного інтервалу
Liu та ін., 2024 [9]	Вугілля + біомаса	ТГА/TG-FTIR; аналіз газових продуктів і взаємодії компонентів	Friedman, метод Озави–Флінна–Волла, KAS, STA	Спільний піроліз має стадійні синергетичні ефекти; для інтерпретації потрібне поєднання даних масової втрати та аналізу газових продуктів
Ma та ін., 2024 [10]	Вугільний шлам + бамбук moso	ТГА, TG-FTIR, PCA, ANN	KAS, метод Озави–Флінна–Волла, метод Старінка, метод Коутса–Редферна	Багатометодний аналіз дає змогу поєднати кінетичну оцінку, аналіз газових продуктів і моделювання поведінки суміші
Qin та ін., 2024 [11]	Кілька видів вугілля + евкаліпт	ТГА/ДТГ, аналіз взаємодії компонентів	KAS, метод Озави–Флінна–Волла, метод Коутса–Редферна	Тип вугілля і частка біомаси змінюють синергетичний ефект і кінетичну поведінку суміші
Baidildina та ін., 2025 [14]	Антрацит + соснова тирса, композитне паливо	Аналіз термічного розкладання, займання, горіння і газифікації	Кінетична інтерпретація розкладання	Композитне паливо демонструє неадитивну поведінку і вищу реакційну здатність порівняно з простою фізичною сумішшю
Zhuikov та ін., 2024 [15]	Напівкокс + кедрова деревина	ТГА за різних швидкостей нагрівання	Friedman, метод Озави–Флінна–Волла	Суміші твердого вуглецевого палива і деревини мають накладання стадій та синергетичні ефекти
Kieush та ін., 2025 [16]	Бітумінозне вугілля + лушпиння соняшнику / шкаралупа волоського горіха	Лабораторний реактор і ТГА; суміші 1:1	Кінетична інтерпретація спільного піролізу	Спільний піроліз вугілля і біомаси впливає на вихід летких речовин та формування вуглецевих продуктів

Джерело: складено автором за даними [1; 8–11; 14–16].

Таблиця 3. Дані для оцінювання впливу частки Salix на температуру займання та енергію активації суміші з вугіллям

Склад зразка	Частка біомаси, %	*Ti*, °C	*Tb*, °C	*E* за методом Коутса–Редферна, кДж/моль	Зниження *E* щодо вугілля, %	R^2
100 % C	0	444	571	86,94	0,0	0,9949
5 % B + 95 % C	5	433	564	77,42	11,0	0,9894
10 % B + 90 % C	10	429	565	60,01	31,0	0,9800
15 % B + 85 % C	15	417	561	47,84	45,0	0,9500
20 % B + 80 % C	20	407	563	38,81	55,4	0,9400
30 % B + 70 % C	30	393	565	25,38	70,8	0,9100
100 % B	100	288	391	34,46	60,4*	0,8500

Джерело: складено автором на основі [8]; *відносне зниження E розраховано автором щодо 100 % C. *Для 100 % B значення наведене довідково, оскільки чиста біомаса не є паливною сумішшю з вугіллям.*

Дані табл. 3 кількісно ілюструють, як біомасний компонент змінює термокінетичну поведінку паливної системи. Для чистого вугілля енергія активації становить 86,94 кДж/моль, тоді як для суміші з 30 % Salix – 25,38 кДж/моль. Відносне зниження дорівнює (86,94 − 25,38)/86,94 × 100 % = 70,8 %. Температура займання за тієї самої зміни складу зменшується з 444 до 393 °C, тобто на 51 °C або 11,5 %. Ці розрахунки підтверджують, що додавання біомаси істотно полегшує початкове займання і знижує розрахункову енергію активації для прийнятої моделі Коутса–Редферна. Водночас чиста біомаса має E = 34,46 кДж/моль, тобто не є простою нижньою межею для всіх сумішей. Нижче значення E для суміші з 30 % Salix порівняно зі 100 % біомасою відображає неадитивність термокінетичної поведінки системи, оскільки ефективний параметр залежить від конкретної стадії, атмосфери, модельного припущення, взаємодії летких продуктів, мінеральної складової, тепломасообміну та накладання реакційних ділянок.

Кількісні дані для системи «вугілля + Salix» свідчать про нелінійність впливу біомаси. Температура займання зменшується зі зростанням частки Salix, тоді як енергія активації досягає мінімального значення для суміші з 30 % біомаси, а для чистої біомаси знову зростає порівняно з цією сумішшю. Така залежність узгоджується з уявленням про взаємодію компонентів: біомаса полегшує ранні стадії займання завдяки високому вмісту летких речовин, але загальна кінетична поведінка суміші визначається не лише часткою біомаси, а й співвідношенням летких речовин, фіксованого вуглецю, мінеральної частини та умов нагрівання. Для додаткового контролю цієї логіки зіставлено модельну оцінку за методом Коутса–Редферна з опублікованими ізоконверсійними оцінками, отриманими для іншої системи вугілля

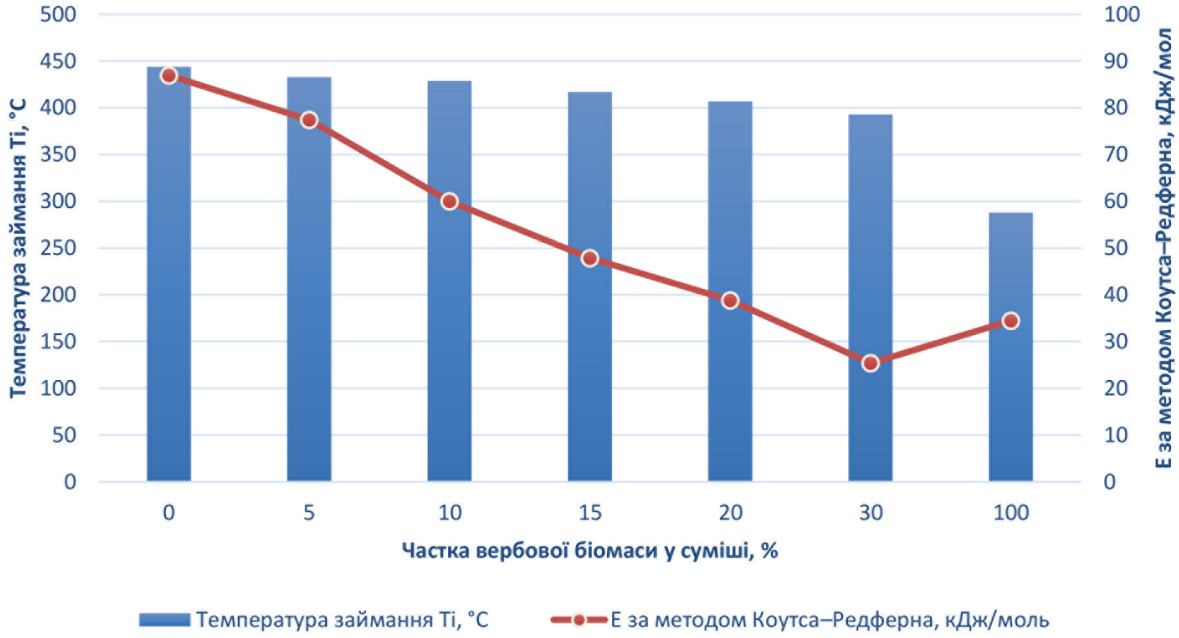


Рис. 2. Зміна температури займання та енергії активації за методом Коутса–Редферна залежно від частки Salix у суміші з вугіллям
Джерело: побудовано автором за даними [8].

Таблиця 4. Контрольне зіставлення ізоконверсійних оцінок енергії активації для суміші вугілля і кукурудзяної соломи

Ступінь перетворення α	*E* за методом Озави–Флінна–Волла, кДж/моль	R^2	*E* за методом Кіссінджера–Акахіри–Суносе, кДж/моль	R^2	Різниця між методами, кДж/моль
0,60	126,65	0,9830	121,18	0,9797	5,47
0,65	103,87	0,9911	96,63	0,9889	7,24
0,70	102,35	0,9999	94,68	0,9999	7,67
0,75	100,48	0,9995	92,47	0,9993	8,01
0,80	96,72	0,9977	88,28	0,9968	8,44
0,85	91,73	0,9965	82,81	0,9949	8,92
0,90	86,69	0,9964	77,27	0,9945	9,42
0,95	81,27	0,9967	71,31	0,9948	9,96
Середнє	98,72	–	90,58	–	8,14

Джерело: складено автором на основі [12]; *середні значення та різницю між методами розраховано автором.*

і твердої біомаси на основі багатошвидкісних ТГА-даних (табл. 4).

Верифікаційне зіставлення ізоконверсійних оцінок за даними Wang та ін. підтверджує доцільність розгляду енергії активації як функції ступеня перетворення, а не як одного сталого параметра. Для суміші вугілля і кукурудзяної соломи в інтервалі $\alpha = 0{,}60–0{,}95$ енергія активації за методом Озави–Флінна–Волла зменшується зі 126,65 до 81,27 кДж/моль, тобто на 35,8 %. У тому самому інтервалі середнє значення E за методом Озави–Флінна–Волла становить 98,72 кДж/моль, за методом Кіссінджера–Акахіри–Суносе – 90,58 кДж/моль, а середня абсолютна різниця між методами дорівнює 8,14 кДж/моль. Високі значення R^2 для обох методів свідчать про статистичну стійкість лінійної апроксимації в обраному інтервалі α. Отриманий результат підтверджує центральну методичну тезу статті: для сумішей вугілля і твердої біомаси кінетичний аналіз має враховувати зміну E(α), тоді як метод Коутса–Редферна доцільно використовувати для модельної інтерпретації окремих температурних ділянок після попереднього виділення стадій.

Окремо слід ураховувати вплив швидкості нагрівання. Для суміші 15 % вербової біомаси (*Salix*) + 85 % вугілля збільшення β з 10 до 30 К/хв у даних Ма та ін. супроводжується зниженням E за методом Коутса–Редферна з 47,84 до 23,06 кДж/моль [8]. Така зміна підтверджує чутливість розрахованих параметрів до температурної програми експерименту й вибраної моделі. Параметри, отримані за однією ТГА-кривою, мають обмежену переносимість на інші режими нагрівання. Для теплоенергетичних розрахунків доцільно використовувати багатошвидкісні дані й перевіряти зміну $E(\alpha)$.

Практична рекомендація полягає у комбінованому застосуванні методів. Методи Старінка та Озави–Флінна–Волла доцільно використовувати тоді, коли потрібно встановити зміну ефективної енергії активації за ступенем перетворення і виявити складність процесу. Метод Коутса–Редферна доцільний для модельного опису окремої стадії, але його результат залежить від вибору $g(\alpha)$, температурного інтервалу та припущення про однорідність процесу. Для систем вугілля і твердої біомаси методично захищеним є підхід, у якому ізоконверсійні методи спочатку визначають профіль $E(\alpha)$, а метод Коутса–Редферна потім використовується для інтерпретації конкретних температурних ділянок.

Для теплоенергетики головний висновок полягає в тому, що кінетика сумішей вугілля і біомаси не повинна зводитися до одного середнього значення *E*. Якщо розрахунок пов'язаний із займанням, слід орієнтуватися на низькотемпературну ділянку виходу летких речовин і початку окиснення. Якщо завданням є опис вигоряння, потрібне окреме врахування коксового або коксозольного залишку. Якщо мета полягає в порівнянні паливних сумішей для котельного або топкового застосування, доцільно аналізувати не лише *E*, а й *Ti*, *Tb*, ДТГ-піки, індекси горіння, зольність і можливі мінеральні ефекти.

ВИСНОВКИ

Термічне перетворення сумішей вугілля і твердої біомаси має багатостадійну природу, тому його некоректно описувати одним усередненим кінетичним параметром без прив'язки до стадії процесу й атмосфери досліду. Дегідратація, вихід летких речовин, розкладання біомасної органічної матриці, термічна деструкція вугілля і вигоряння коксового або коксозольного залишку частково накладаються, формуючи змінну ефективну енергію активації.

Порівняння методів Старінка, Озави–Флінна–Волла та Коутса–Редферна показало різну методичну роль цих підходів. Методи Старінка та Озави–Флінна–Волла є доцільними для ізоконверсійного аналізу $E(\alpha)$, оскільки не потребують попереднього вибору механізму реакції і краще відображають зміну кінетичного бар'єра. Метод Коутса–Редферна зручний для модельного опису окремої стадії, але його результат залежить від вибору $g(\alpha)$, температурного інтервалу, основи лінеаризації та припущення про однорідність процесу.

Емпіричне узагальнення даних для системи «вугілля + Salix» показало, що збільшення частки біомаси від 0 до 30 % знижує температуру займання з 444 до 393 °C, а енергію активації за методом Коутса–Редферна – з 86,94 до 25,38 кДж/моль. Відносне зниження E становить 70,8 %, що підтверджує суттєвий вплив біомасного компонента на ранні стадії окиснювального термічного перетворення. Водночас немонотонність залежності для чистої біомаси й різна дія 15 % та 30 % вербової біомаси (*Salix*) у температурному інтервалі 400–530 °C свідчать, що синергетичний ефект не можна зводити до простого зниження середньої енергії активації. Швидкість нагрівання істотно впливає на отримані кінетичні параметри. Для суміші 15 % Salix + 85 % вугілля збільшення β з 10 до 30 K/хв зменшує E за методом Коутса–Редферна з 47,84 до 23,06 кДж/моль у межах використаного джерела. Такий результат відображає чутливість модельної оцінки до температурної програми експерименту й вибраної кінетичної моделі.

Верифікаційне зіставлення опублікованих ізоконверсійних оцінок для суміші вугілля і кукурудзяної соломи показало, що Eα не є сталою величиною: у діапазоні $\alpha = 0{,}60–0{,}95$ значення за методом Озави–Флінна–Волла зменшується зі 126,65 до 81,27 кДж/моль, а середня різниця між методами Озави–Флінна–Волла та Кіссінджера–Акахіри–Суносе становить 8,14 кДж/моль, що підтверджує доцільність використання ізоконверсійного профілю $E(\alpha)$ як перевірочного етапу перед модельною інтерпретацією окремих стадій методом Коутса–Редферна.

Практична рекомендація полягає у комбінованому застосуванні методів. Методи Старінка та Озави–Флінна–Волла мають використовуватися для первинної діагностики складності термічного перетворення й побудови профілю $E(\alpha)$, а метод Коутса–Редферна – для модельного опису окремих температурних ділянок після їх попереднього виділення.

Методологічні межі дослідження визначаються його порівняльно-аналітичним характером і використанням опублікованих ТГА/ДТГ-даних. Отримані результати уточнюють логіку застосування методів Старінка, Озави–Флінна–Волла та Коутса–Редферна до паливних сумішей вугілля і твердої біомаси; подальше поглиблення цього підходу доцільно пов'язувати з єдиним експериментальним масивом ТГА/ДТГ за щонайменше трьох швидкостей нагрівання, таблицями Tα для фіксованих ступенів перетворення, коефіцієнтами лінійної регресії та аналізом залишків.

Декларація про використання ШІ. У процесі підготовки цієї наукової статті було використано інструменти штучного інтелекту, зокрема ChatGPT 5.3 (розробник – OpenAI), Grammarly, DeepL Translator, а також Jenni AI, з метою підтримки редакційно-аналітичної роботи. Використання зазначених інструментів полягало у допомозі при структуризації матеріалу, удосконаленні стилістичного оформлення тексту, формулюванні окремих наукових положень, перекладі фрагментів тексту та узагальненні інформації на основі наданих автором даних і джерел.

Водночас усі ключові ідеї, наукові підходи, інтерпретації результатів дослідження та висновки сформовані автором самостійно. Інструменти штучного інтелекту не використовувалися для генерації первинних наукових результатів, аналізу емпіричних даних або формування оригінальних дослідницьких висновків без участі автора.

Автор несе повну відповідальність за наукову новизну, зміст статті, достовірність наведених даних, коректність посилань та відповідність роботи принципам академічної доброчесності.

REFERENCES

[1] Dunayevska N. I., Zasyadko Y. I., Shchudlo T. S. (2018). Thermal destruction kinetics of coal and solid biomass mixtures. Ukrainian Food Journal, 7(4). pp. 738–753. https://doi.org/10.24263/2304-974X-2018-7-4-17

[2] Morgan T. J., Kandiyoti R. (2014). Pyrolysis of coals and biomass: analysis of thermal breakdown and its products. Chemical Reviews, 114 (3), pp. 1547–1607. https://doi.org/10.1021/cr400194p

[3] Coats A. W., Redfern J. P. (1964). Kinetic parameters from thermogravimetric data. Nature, 201, pp. 68-69. https://doi.org/10.1038/201068a0

[4] Ozawa T. (1965). A new method of analyzing thermogravimetric data. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 38(11), pp. 1881–1886. https://doi.org/10.1246/bcsj.38.1881

[5] Flynn J. H., Wall L. A. (1966). A quick, direct method for the determination of activation energy from thermogravimetric data. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Letters, 4(5), pp. 323–328. https://doi.org/10.1002/pol.1966.110040504

[6] Starink M. J. (2003). The determination of activation energy from linear heating rate experiments: a comparison of the accuracy of isoconversion methods. Thermochimica Acta, 404 (1-2), pp. 163–176. https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00144-8

[7] Vyazovkin S., Burnham A. K., Criado J. M., Pérez-Maqueda L. A., Popescu C., Sbirrazzuoli N. (2011). ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. Thermochimica Acta, 520(1-2), pp. 1–19. https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.034

[8] Ma Y., Feng B., Gao L., Guo Z., Ai Y., Sun H., Zhang Y., Pan Z., Mao J., Yan R., Ye N., Deng L. (2025). Thermogravimetric experimental study on the co-combustion characteristics of coal and Salix. Energies, 18, (1), Article 56. https://doi.org/10.3390/en18010056

[9] Liu N., Huang H., Huang X., Li R., Feng J., Wu Y. (2024). Co-pyrolysis behavior of coal and biomass: synergistic effect and kinetic analysis. ACS Omega, 9 (29), pp. 31803–31813. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03053

[10] Ma X., Ning H., Zhang X., Zang Z., Xing X. (2024). Co-combustion characteristics of coal slime and moso bamboo based on artificial neural network modeling and TG-FTIR. Energy, 313, Article 133816. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133816

[11] Qin S., Chen C., He L., Ma X. (2024). Co-combustion characteristics, interaction and kinetic analysis of multiple coal and eucalyptus. Industrial Crops and Products, 222, Article 119980. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119980

[12] Wang Y., et al. (2021). A comparison of combustion properties in biomass-coal blends. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(24), Article 12980. https://doi.org/10.3390/ijerph182412980

[13] Gil M. V., Casal D., Pevida C., Pis J. J., Rubiera F. (2010). Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion. Bioresource Technology, 101(14), pp. 5601–5608. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.008

[14] Baidildina A., Nurgaliyeva A., Kopyev E., et al. (2025). Thermal decomposition, ignition, combustion and gasification of coal and biomass composite. Energies, 18(24), Article 6379. https://doi.org/10.3390/en18246379

[15] Zhuikov A., Kuznetsov G., Strizhak P., et al. (2024). Advanced fuel based on semi-coke and cedarwood: kinetic characteristics and synergetic effects. Energies, 17(19), Article 4963. https://doi.org/10.3390/en17194963

[16] Kieush L., Koveria A., et al. (2025). Co-pyrolysis of biomass with bituminous coal in a fixed-bed reactor for biofuel and bioreducing agents production. Sustainability, 17(17), Article 7654. https://doi.org/10.3390/su17177654

[17] Bongomin O., Nzila C., et al. (2024). Comprehensive thermal properties, kinetic, and thermodynamic analyses of biomass waste pyrolysis via TGA and Coats-Redfern methodologies. Energy Conversion and Management: X, 24, Article 100723. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100723

[18] Açıkalın K., Karaca C., Bolat E. (2021). Determination of kinetic triplet, thermal degradation behaviour and thermodynamic properties for pyrolysis of a lignocellulosic biomass. Bioresource Technology, 337, Article 125438. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125438

[19] Almusafir R., et al. (2024). Thermal decomposition and kinetic parameters of three biomass materials. Energies, 17(2), Article 396. https://doi.org/10.3390/en17020396

[20] Lei J., et al. (2024). Evaluation of kinetic and thermodynamic parameters for bamboo powder pyrolysis and combustion using thermogravimetric analysis. Processes, 12(11), Article 2458. https://doi.org/10.3390/pr12112458

[21] NETZSCH. Ozawa-Flynn-Wall Analysis. https://kinetics.netzsch.com/en/documents/glossary/ozawa-flynn-wall-analysis (дата звернення: 18.05.2026)

[22] Dzhezhulei V. O., et al. (2025). Technology of co-firing coal and biomass: features, current state, and prospects. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. № 4, pp. 25–32. https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2025/4/04_2025_Dzhezhulei.pdf (дата звернення: 18.05.2026)

[23] Dunaevskaya N. I. (2020). Technology of anthracite and solid biofuels co-firing in pulverized coal boilers. Science and Innovation, 16(4), pp. 58–65. https://doi.org/10.15407/scine16.04.058

[24] Shakor Z. M., et al. (2025). Thermogravimetric analysis integrated with mathematical models and correlations: a review. ACS Omega. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02250

[25] Koga N. (2013). Ozawa's kinetic method for analyzing thermoanalytical curves. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 113, pp. 1527–1541. https://doi.org/10.1007/s10973-012-2882-5

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Дунаєвська Н. І., Засядько Я. І., Щудло Т. С. (2018). Thermal destruction kinetics of coal and solid biomass mixtures. Ukrainian Food Journal. 7(4). pp. 738–753. https://doi.org/10.24263/2304-974X-2018-7-4-17

[2] Morgan T. J., Kandiyoti R. (2014). Pyrolysis of coals and biomass: analysis of thermal breakdown and its products. Chemical Reviews. 114 (3), pp. 1547–1607. https://doi.org/10.1021/cr400194p

[3] Coats A. W., Redfern J. P. (1964). Kinetic parameters from thermogravimetric data. Nature. 201, pp. 68–69. https://doi.org/10.1038/201068a0

[4] Ozawa T. (1965). A new method of analyzing thermogravimetric data. Bulletin of the Chemical Society of Japan. 38 (11), pp. 1881–1886. https://doi.org/10.1246/bcsj.38.1881

[5] Flynn J. H., Wall L. A. (1966). A quick, direct method for the determination of activation energy from thermogravimetric data. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Letters. 4 (5), pp. 323–328. https://doi.org/10.1002/pol.1966.110040504

[6] Starink M. J. (2003). The determination of activation energy from linear heating rate experiments: a comparison of the accuracy of isoconversion methods. Thermochimica Acta. 404 (1-2), pp. 163–176. https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00144-8

[7] Vyazovkin S., Burnham A. K., Criado J. M., Pérez-Maqueda L. A., Popescu C., Sbirrazzuoli N. (2011). ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. Thermochimica Acta. 520(1-2), pp. 1–19. https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.034

[8] Ma Y., Feng B., Gao L., Guo Z., Ai Y., Sun H., Zhang Y., Pan Z., Mao J., Yan R., Ye N., Deng L. (2025). Thermogravimetric experimental study on the co-combustion characteristics of coal and Salix. Energies. 18 (1), Article 56. https://doi.org/10.3390/en18010056

[9] Liu N., Huang H., Huang X., Li R., Feng J., Wu Y. (2024). Co-pyrolysis behavior of coal and biomass: synergistic effect and kinetic analysis. ACS Omega. 9 (29), pp. 31803–31813. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03053

[10] Ma X., Ning H., Zhang X., Zang Z., Xing X. (2024). Co-combustion characteristics of coal slime and moso bamboo based on artificial neural network modeling and TG-FTIR. Energy. 313, Article 133816. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133816

[11] Qin S., Chen C., He L., Ma X. (2024). Co-combustion characteristics, interaction and kinetic analysis of multiple coal and eucalyptus. Industrial Crops and Products. 222, Article 119980. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119980

[12] Wang Y., et al. (2021). A comparison of combustion properties in biomass-coal blends. International Journal of Environmental Research and Public Health. 18(24), Article 12980. https://doi.org/10.3390/ijerph182412980

[13] Gil M. V., Casal D., Pevida C., Pis J. J., Rubiera F. (2010). Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion. Bioresource Technology. 101(14), pp. 5601–5608. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.008

[14] Baidildina A., Nurgaliyeva A., Kopyev E., et al. (2025). Thermal decomposition, ignition, combustion and gasification of coal and biomass composite. Energies. 18 (24), Article 6379. https://doi.org/10.3390/en18246379

[15] Zhuikov A., Kuznetsov G., Strizhak P., et al. (2024).Advanced fuel based on semi-coke and cedarwood: kinetic characteristics and synergetic effects. Energies. 17(19), Article 4963. https://doi.org/10.3390/en17194963

[16] Kieush L., Koveria A., et al. (2025). Co-pyrolysis of biomass with bituminous coal in a fixed-bed reactor for biofuel and bioreducing agents production. Sustainability. 17(17), Article 7654. https://doi.org/10.3390/su17177654

[17] Bongomin O., Nzila C., et al. (2024). Comprehensive thermal properties, kinetic, and thermodynamic analyses of biomass waste pyrolysis via TGA and Coats-Redfern methodologies. Energy Conversion and Management: X. 24, Article 100723. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100723

[18] Açıkalın K., Karaca C., Bolat E. (2021). Determination of kinetic triplet, thermal degradation behaviour and thermodynamic properties for pyrolysis of a lignocellulosic biomass. Bioresource Technology. 337, Article 125438. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125438

[19] Almusafir R., et al. (2024). Thermal decomposition and kinetic parameters of three biomass materials. Energies. 17(2), Article 396. https://doi.org/10.3390/en17020396

[20] Lei J., et al. (2024). Evaluation of kinetic and thermodynamic parameters for bamboo powder pyrolysis and combustion using thermogravimetric analysis. Processes. 12(11), Article 2458. https://doi.org/10.3390/pr12112458

[21] NETZSCH. Ozawa-Flynn-Wall Analysis. https://kinetics.netzsch.com/en/documents/glossary/ozawa-flynn-wall-analysis (дата звернення: 18.05.2026)

[22] Dzhezhulei V. O., et al. (2025). Technology of co-firing coal and biomass: features, current state, and prospects. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. № 4. pp. 25–32. https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2025/4/04_2025_Dzhezhulei.pdf (дата звернення: 18.05.2026)

[23] Дунаєвська Н. І. (2020) Technology of anthracite and solid biofuels co-firing in pulverized coal boilers. Science and Innovation. 16(4), pp. 58–65. https://doi.org/10.15407/scine16.04.058

[24] Shakor Z. M., et al. (2025). Thermogravimetric analysis integrated with mathematical models and correlations: a review. ACS Omega. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02250

[25] Koga N. (2013). Ozawa's kinetic method for analyzing thermoanalytical curves. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 113, pp. 1527–1541. https://doi.org/10.1007/s10973-012-2882-5

© Джежулей В. О.
Дата першого надходження статті до видання: 15.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)