УДК 662.951.23
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.2/32

Правовєров А.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ БІОМАСИ В КОТЕЛЬНІЙ УСТАНОВЦІ З МЕТОЮ ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В контексті переходу до відновлюваних джерел енергії, спалювання біомаси в котельних установках набуває актуальності, як альтернатива традиційним видам палива. Робота присвячена математичному моделюванню процесу згоряння біомаси в котельній установці з урахуванням основних стадій теплового розкладу палива. Актуальність дослідження полягає у необхідності зниження рівня шкідливих викидів у процесах теплогенерації з використанням біомаси. Метою роботи було моделювання фізико-хімічних процесів згоряння біомаси у котельній установці з метою підвищення екологічної безпеки використання відновлюваних енергетичних ресурсів. У статті представлено математичні моделі процесу згоряння біопалива в котельній установці з урахуванням фазових перетворень палива на стадіях сушіння, піролізу, окиснення летких сполук та згоряння вуглецевого залишку. Розроблена модель включала рівняння матеріального балансу, теплообміну в частинках біомаси, що згоряє та кінетичні рівняння. Проведено оцінку впливу технологічних параметрів процесу на утворення оксиду вуглецю (II) та оксидів азоту NOx. Особливу увагу приділено ролі коефіцієнта надлишку повітря, температури в камері згоряння, а також співвідношенню первинного та вторинного повітря в утворенні шкідливих викидів. Запропонована математична модель базується на системі диференційних рівнянь першого порядку. Система рівнянь включала кінетику зміни маси вологи, летких компонентів та вуглецевого залишку в процесі згоряння біомаси. Для опису процесів утворення оксидів азоту застосовано механізм Зольдовича, що враховує температурні залежність швидкості хімічних реакцій за участю молекулярного азоту та кисню. Розроблена модель дозволяє відтворити реальні умови роботи котельних установок, які працюють на біомасі, з урахуванням безперервної подачі палива до камери згоряння. Запропоновано режими оптимального керування котельною установкою при надлишку повітря $\lambda = 1.2–1.5$ та за умови підтримання температури в середині камери згоряння в діапазоні 850–1100 °C. Запропоновані параметри роботи установки сприятимуть мінімізації викидів CO та NOx в димових газах.

Ключові слова: *згоряння біомаси, котельні установка, математичне моделювання, екологічна безпека, тепловий баланс, газові викиди.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростаючої енергетичної кризи та необхідності зниження викидів парникових газів, все більшого значення набуває використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біомаси [1, с. 2]. Біомаса, як альтернативне паливо, характеризується відносно низьким вмістом сірки та потенційно нейтральним вуглецевим балансом, що робить її привабливою з точки зору екологічної безпеки. Проте процес її згоряння є складним і супроводжується низкою проблем – нестабільністю тепловіддачі, утворенням оксидів азоту, чадного газу, твердих частинок та інших забруднювальних речовин [2, с. 3]. Надмірні викиди вуглекислого газу (CO_2) в атмосферу та загроза смогу, особливо в районах великих міських агломерацій, стали серйозною екологічною проблемою. До цього додаються жорсткі законодавчі обмеження з боку країн Європейського Союзу (ЄС), що зумовило необхідність поетапної відмови від використання викопних твердих палив у малому енергетичному секторі [4, с. 2]. У більшості країн ЄС антрацит та кам’яне вугілля майже повністю виведені з ринку як паливо для малопотужних котлів у домогосподарствах. Їх місце зайняли відновлювані джерела енергії – деревна та аграрна біомаса, які залишаються доступними та перспективними альтернативами для опалення приватних

© Правовєров А.О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

житлових будівель [5, с. 155]. Згоряння твердого біопалива у побутових котлах малої потужності може сприяти зменшенню загальних викидів CO_2 в атмосферу завдяки нейтральному вуглецевому балансу [6, с. 2]. Проте саме по собі це не гарантує зменшення рівня небезпечних викидів, зокрема монооксиду вуглецю (CO), оксидів азоту (NO_x) та твердих частинок (пилу). Ці речовини є складовими смогу і безпосередньо впливають на здоров'я населення [1-3]. Ефективне спалювання біомаси в котельних установках вимагає точного регулювання режимів горіння, конструктивних особливостей пальникових пристроїв і систем подачі палива. Традиційні експериментальні методи оптимізації таких процесів є дороговартісними та час затратними, особливо при необхідності врахування широкого спектра параметрів. У цьому контексті чисельне моделювання процесу згоряння біомаси набуває ключового значення як інструмент для аналізу, прогнозування та оптимізації теплотехнічних і екологічних характеристик котельних установок. У зв'язку з цим з 2020 року в країнах ЄС набула чинності директива ECODESIGN. Вона регламентує екологічні вимоги до процесу згоряння біомаси в котлах малої потужності, призначених для опалення індивідуальних будинків. Згідно з цією нормою, гранично допустимі викиди повинні становити: CO – не більше 500 мг/Нм³, NO_x – до 200 мг/Нм³, пилу – до 40 мг/Нм³ при вмісті кисню у відхідних газах 10% [4-6].

Забезпечення відповідності цим вимогам передбачає не лише використання якісної сировини, а й суттєве вдосконалення конструкційних та експлуатаційних характеристик котлів. Зокрема, йдеться про підвищення ефективності згоряння, що тісно пов'язано зі зменшенням викидів забруднювальних речовин [7, с. 2]. Недостатнє опрацювання моделей згоряння біомаси з урахуванням її реологічних і хімічних властивостей, а також впливу конструктивних параметрів котлів на ефективність горіння залишається актуальною проблемою. Це створює потребу у розробці та вдосконаленні відповідних математичних і комп'ютерних моделей [8, с. 7]. Це дозволить не лише підвищити ефективність енергетичних систем, що працюють на біомасі, але й суттєво знизити їх екологічне навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження свідчать про зростаючий інтерес наукової спільноти до моделювання та оптимізації процесів згоряння біомаси з метою підвищення енергоефективності та зменшення негативного впливу на довкілля. Основна увага зосереджена на розробці чистих технологій горіння, удосконаленні конструкцій котлів, а також екологічному моніторингу викидів забруднювальних речовин. З огляду на актуальність проблеми, у численних наукових установах ЄС активно ведуться дослідження, спрямовані на ідентифікацію властивостей біомаси, яка використовується як паливо в малопотужних котлах. Паралельно здійснюється моделювання процесу її згоряння та оптимізація параметрів горіння з метою досягнення високої енергоефективності та низьких викидів [1, с. 3]. З огляду на актуальність проблеми, у численних наукових установах ЄС активно ведуться дослідження, спрямовані на ідентифікацію властивостей біомаси, яка використовується як паливо в малопотужних котлах. Паралельно здійснюється моделювання процесу її згоряння та оптимізація параметрів горіння з метою досягнення високої енергоефективності та низьких викидів [3]. Згідно з узагальненим аналізом Шарми та співавторів [1, с. 3], ефективне згоряння біомаси вимагає комплексного підходу. Він передбачає вибір оптимального типу палива, контроль температурного режиму, коректне дозування повітря, а також застосування методів вторинного очищення газів. Особливу увагу автори приділяють зменшенню корозійного зношування та підвищенню екологічності процесу. Математичне моделювання є важливим інструментом для передбачення динаміки згоряння. Наприклад, у роботі Баки, Носека та Чаї [2, с. 4] розроблено аналітичну модель горіння біомаси, яка враховує диференційовані механізми теплового розкладу палива. Вона дає змогу оцінити вплив основних параметрів на температуру та швидкість горіння. Бала-Літвіняк і Мусіал [3, с. 4] поєднали чисельні та експериментальні підходи для вивчення згоряння різних типів біомаси в побутовому котлі. Їхні результати демонструють значну варіативність температурного режиму та структури залишкових продуктів залежно від вологості й складу палива. Дослідження впливу золи від згоряння аграрної біомаси на навколишнє середовище провели Сюй та співавтори [4, с. 5]. Вони встановили, що зола може містити потенційно токсичні мікроелементи, а отже, потребує контролю під час утилізації або вторинного використання.

У галузі оптимізації конструкцій котельних установок важливими є роботи, що висвітлюють моделювання подачі повітря та впливу геометрії топки. Зокрема, Су та співавтори [8, с. 4] проаналізували розподіл первинного повітря у ґратковому

котлі потужністю 130 т/год. Це дозволило знизити локальні викиди CO та NO_x шляхом коригування подачі кисню в зону догорання. Системні аспекти моделювання біоенергетичних установок розглянуто в роботі Чжана та ін. [6, с. 2], де запропоновано динамічну модель електростанції з біомаси з інтегрованим уловлюванням CO_2. Такий підхід дозволяє не лише мінімізувати викиди, а й перейти до концепції негативних викидів вуглецю. Порівняльний аналіз результатів експериментального та чисельного вивчення ко-спалювання аграрної біомаси з вугіллям в умовах змінних параметрів подачі палива та повітря представлено в публікації Мілічевича та колег [7, с. 6]. Отримані дані демонструють залежність ефективності горіння від режимів подачі компонентів і складу суміші. З практичної точки зору, окрему увагу слід приділити питанням контролю викидів у різних типах установок. Наприклад, Еппле та Рейк [5, с. 156; 9, с. 430] на основі комп'ютеризованого аналізу продемонстрували можливості зменшення викидів NO_x у вугільних та газових котлах. Це стало можливим завдяки зміні геометрії пальників і температурного профілю топки. Загальний огляд характеристик горіння біомаси, включаючи вплив її фізико-хімічних властивостей, наведено в роботі Чжана та ін. [10, с. 7]. Автори відзначають, що структура частинок, зольність, вологість і вміст летких речовин істотно впливають на інтенсивність тепловиділення, хід піролізу та рівень залишкового вуглецю. Наприклад, у [10] досліджено ефективність спалювання деревних пелет у побутових котлах при різних режимах навантаження та налаштуваннях пальників. Авторами було встановлено, що конфігурація пальника суттєво впливає на енергетичну ефективність та рівень викидів: вища ефективність досягається за умови зниженого теплового навантаження. У роботі [3, с. 2] проведено аналіз експлуатації пелетних котлів, встановлених у житлових будинках у Німеччині, Австрії, Великій Британії та Іспанії. У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування чисельного моделювання процесу згоряння біомаси в котельних установках як інструменту для прогнозування теплотехнічних та екологічних характеристик обладнання. Це дозволяє створити інженерні рішення, що поєднують високу енергоефективність із відповідністю екологічним стандартам, а також сприяє розвитку екологічно безпечної побутової енергетики.

Постановка завдання. Метою є розроблення та аналіз математичної моделі процесу згоряння біомаси в котельній установці малої потужності з урахуванням етапів сушіння, піролізу, окиснення летких речовин і твердого залишку. Також досліджується вплив ключових параметрів горіння на екологічні характеристики димових газів, зокрема на концентрацію оксиду вуглецю (CO), оксидів азоту (NO_x) та твердих частинок. Результати моделювання спрямовані на виявлення умов, що забезпечують високий рівень енергоефективності та відповідність нормативам ЄС у сфері екодизайну. Це є особливо актуальним у контексті впровадження сталих технологій у секторі побутової енергетики.

Виклад основного матеріалу. Процес згоряння біомаси є складним фізико-хімічним явищем, який включає етапи висушування, піролізу, газифікації та окиснення твердих залишків. Для його адекватного опису використовується система рівнянь, що враховує: масоперенос; теплоперенос (конвекція, теплопровідність, радіація); кінетику хімічних реакцій (горіння летких речовин і твердого залишку) [6, с. 4]. У розрахунках параметрів котельних установок використаємо наступні рівняння:

Рівняння збереження маси (континуум):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathrm{u}) = m \qquad (1)$$

де: ρ – густина газу, u – вектор швидкості, m – джерело маси (наприклад, виділення газів з біомаси під час піролізу).

Рівняння імпульсу (навіє-Стокса):

$$\frac{\partial (\rho \mathrm{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathrm{uu}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathrm{u}) + \rho \mathrm{g} + \mathrm{F} \qquad (2)$$

де: p – тиск, μ – динамічна в'язкість, g – вектор гравітації, F – додаткові сили (наприклад, від частинок біомаси), t- час, с.

Рівняння енергетичного балансу:

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathrm{u} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q \qquad (3)$$

де: h – ентальпія, λ – коефіцієнт теплопровідності, T – температура, Q – джерело тепла (екзотермічні реакції горіння), Дж.

Рівняння компонентного складу (леткі речовини, O_2, CO_2, H_2O,):

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathrm{u} Y_i) = \nabla \cdot (D_i \nabla Y_i) + Q \qquad (4)$$

де: Y_i – масова частка компонента i, D_i – коефіцієнт дифузії.

Модель хімічної кінетики горіння

Процес горіння описується узагальненими реакціями, що описуються рівняннями (5) та (6).

Піроліз:

- Біомаса → леткі сполуки + твердий залишок (вуглецевий залишок)

Окиснення летких компонентів:

$$C_xH_y + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O \quad (5)$$

Горіння вуглецевого залишку:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \text{ або } C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO \quad (6)$$

Рівняння теплового випромінювання:

$$\nabla \cdot (a\nabla G) - a\beta G = -4\pi a\sigma T^4 + Q_r \quad (7)$$

де: G – радіаційна густина енергії, β – коефіцієнт поглинання, σ – стала Стефана–Больцмана, Q_r – теплота джерела/поглинання радіаційної енергії.

На рис. 1 представлено візуалізацію розв'язку моделі у середовищі COMSOL Multiphisics для спалювання однієї частинки біомаси в потоці повітря.

Модель кінетики зміни маси та теплової енергії частинок біомаси в процесі горіння

Коли використовується підхід Ейлера-Лагранжа, масообмінні та енергетичні процеси кінетики горіння біомаси описуються рівняннями (8) та (13) [2, с. 5]:

Для біомаси:

$$\frac{dM_p}{dt} = -M_{вологa} - M_{\text{леткі}} - M_{\text{вуглецевий залишок}} \quad (8)$$

Припущення (для спрощення):

$$M_{вологa} = k_1 m_p, \; M_{\text{леткі}} = k_2 M_p,$$

$$M_{\text{вуглецевий залишок}} = k_3 M_p \quad (9)$$

коефіцієнти k_1, k_2, k_3 – температурозалежні константи швидкості реакцій

Тоді:

$$\frac{dm_p}{dt} = -(k_1 + k_2 + k_3) \cdot M_p = -k \cdot M_p \quad (10)$$

Кінетика зміни маси частинок представлена рівнянням:

$$M_p(t) = M_{p0} \cdot e^{-kt} \quad (11)$$

де: M_{p0} – початкова маса частинки біомаси;

$$k = k_1 + k_2 + k_3 \quad (12)$$

Для теплової енергії:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{M_p c_p}\left(Q_{\text{передача}} - Q_{\text{випаровування}}\right) \quad (13)$$

де: c_p – теплоємність, Дж/(моль·К)

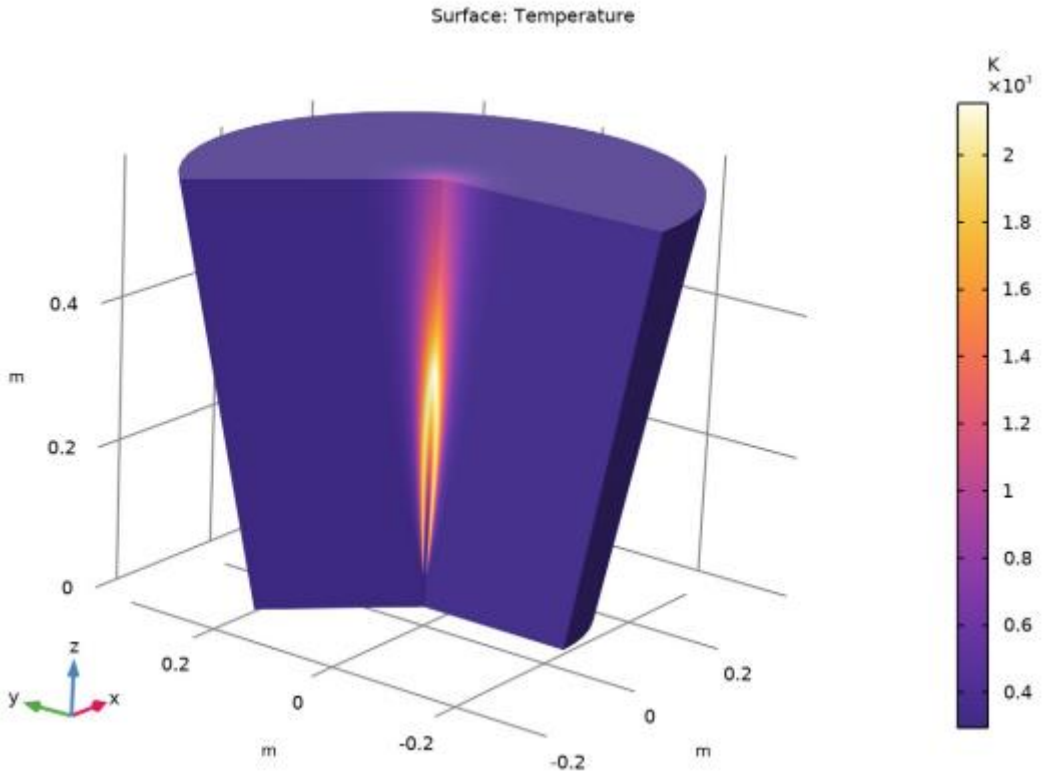

Рис. 1. Розподіл температур у процесі спалювання однієї частинки біомаси в потоці повітря

Джерело: власні обчислення

Рівняння теплового балансу з урахуванням функції маси:

$$Q_{\text{випаровування}} = \dot{m}_{\text{волога}} \cdot h_{\text{вип}} = \\ = k_1 M_p \cdot h_{\text{вип}} = k_1 M_{p0} e^{-kt} \cdot h_{\text{вип}} \quad (14)$$

Рівняння енергії:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{M_p c_p}\left(Q_{\text{передача}} - k_1 M_p h_{\text{вип}}\right) \quad (15)$$

Спрощення:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{c_p}\left(\frac{Q_{\text{передача}}}{M_p} - k_1 h_{\text{вип}}\right) \quad (16)$$

Підставимо $m_p = m_{p0} e^{-kt}$:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{c_p}\left(\frac{Q_{\text{передача}}}{M_{p0} e^{-kt}} - k_1 h_{\text{вип}}\right) \quad (17)$$

Отримане рівняння для $T_p(t)$ має вигляд:

$$\frac{dT_p}{dt} = A \cdot e^{kt} - B \quad (18)$$

де: $A = \frac{Q_{\text{передача}}}{M_{p0} c_p}$, $B = \frac{k_1 h_{\text{вип}}}{c_p}$

Проінтегруємо рівняння (18):

$$T_p(t) = \int \left(A e^{kt} - B\right) dt = \frac{A}{k} e^{kt} - Bt + C \quad (19)$$

де C – стала інтегрування, яку можна визначити з початкової температури $T_p(0) = T_0$:

$$T_p(0) = \frac{A}{k} - 0 + C = T_0 \Rightarrow C = T_0 - \frac{A}{k} \quad (20)$$

Розв'язок рівняння (20) наступний:

$$T_p(t) = \frac{A}{k} e^{kt} - Bt + T_0 - \frac{A}{k} \quad (21)$$

Математичний опис процесу згоряння біомаси в котельній установці, розробленої з урахуванням екологічних характеристик (зниження викидів CO, NO_x, твердих частинок тощо), здійснювали за наступними припущеннями моделі. Біомаса в моделі представлена як однорідна речовина зі сталою вологістю та енергетичними характеристиками [10, с. 3]. Процес згоряння відбувається у три основні стадії: сушіння, піроліз/газифікація, окиснення горючих газів.

Модель масообміну за умови безперервного надходження палива можна представити рівняннями, що включають стадії сушіння біомаси, пролізу та окислення летких компоненнів продуктів горіння:

Стадія 1: Сушіння

$$\frac{dM_w}{dt} = -k_d M_w \quad (22)$$

де: M_w – маса вологи в паливі, кг; k_d – коефіцієнт масовіддачі, 1/с.

Розв'язком рівняння (22) буде:

$$M_w(t) = M_{w0} \cdot e^{-k_d t} \quad (23)$$

де: M_{w0} – початкова маса вологи.

Стадія 2: Піроліз/газифікація

$$\frac{dM_v}{dt} = -k_p M_v \quad (24)$$

де: M_v – маса летких речовин, кг; k_p – константа піролізу, 1/с.

$$M_v(t) = M_{v0} \cdot e^{-k_p t} \quad (25)$$

де: M_{v0} – початкова маса летких речовин у паливі.

Стадія 3: Окиснення летких компонентів і вуглецю

$$\frac{dM_c}{dt} = -k_c M_c \cdot \frac{C_{O_2}}{C_{O_2} + K} \quad (26)$$

де: M_c – маса твердого вуглецю (вугілля), кг; k_c – константа швидкості хімічної реакції окиснення вуглецю; C_{O_2} – концентрація кисню у газовій фазі, моль/м³; K – коефіцієнт надлишку повітря.

Позначимо:

$$\alpha = \frac{k_c \cdot C_{O_2}}{C_{O_2} + K} \quad (27)$$

Для спрощення моделі приймемо концентрацію вуглекислого газу C_{O_2} сталою, що характерно для локальної моделі або при надлишку кисню. Тоді для обчислення кінетики зміни маси частинок біомаси у процесі згоряння отримаємо рівняння виду:

$$\frac{dM_c}{dt} = -\alpha \cdot M_c \quad (28)$$

Розв'язок:

$$M_c(t) = M_{c0} \cdot e^{-\alpha t} = M_{c0} \cdot \exp\left(-\frac{k_c \cdot C_{O_2}}{C_{O_2} + K} \cdot t\right) \quad (29)$$

де: M_{c0} – початкова маса фракції фіксованого вуглецю (твердих залишків).

Енергетичний баланс котельної установки виразимо рівнянням:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = Q_{gen} - Q_{loss} \quad (30)$$

де: ρ – густина середовища, кг/м³; c_p – теплоємність, Дж/(кг·К); T – температура газу, К; Q_{gen} – теплота, що виділяється при згорянні біомаси, Вт; Q_{loss} – втрати теплоти (через неповне згоряння, конвекцію та випромінювання), Вт.

Рівняння для визначення об'ємної концентрації CO та NOx в процесі згоряння біомаси:

Концентрацію CO визначимо з наступного рівняння:

$$\frac{dC_{CO}}{dt} = R_{form,CO} - R_{oxid,CO} \quad (31)$$

де: $R_{form,CO}$ – швидкість утворення CO при неповному згорянні летких речовин; $R_{oxid,CO} = k_{CO} C_{CO} C_{O_2}$ – швидкість окиснення CO до CO_2.

Для обчислення параметрів моделі використовували наступні дані, представлені у табл. 1 та табл. 2.

У Таблиці 1 наведено значення ентальпій утворення основних компонентів, що беруть участь у процесі згоряння біомаси, при температурі 298,15 K. Представлені дані показують порівняння довідкових значень з результатами, отриманими за допомогою програмного середовища COMSOL Multiphysics. Як видно з таблиці, результати моделювання узгоджуються з табличними значеннями, що підтверджує коректність вибраної термодинамічної бази для розрахунків. Незначні відхилення не перевищують 0,1%, що є прийнятним для інженерного аналізу.

У таблиці 2 представлено значення ізобарної теплоємності основних сполук, що беруть участь у процесі горіння біомаси, при температурах 300 K та 2000 K. Порівняння довідкових даних із результатами, отриманими в середовищі COMSOL Multiphysics, свідчить про високу точність чисельного моделювання. Розбіжності між довідковими і модельованими значеннями незначні та залишаються в межах допустимої похибки для термодинамічних розрахунків. Це підтверджує адекватність використаної математичної моделі для подальшого аналізу теплових процесів у котельній установці. Розподіл концентрації вуглекислого газу в зоні спалювання згідно моделі представлено на рис. 2.

Крім вуглекислого газу в процесі спалювання утворюються оксиди азоту. Термічний механізм утворення NO, є ключовим хімічним шляхом утворення оксиду азоту (NO) при згорянні органічного палива, зокрема біомаси, за температур понад 1800 K. Даний механізм Зельдовича, також відомий як механізм Зельдовича. В основі цього механізму лежить взаємодія молекулярного азоту (N_2) з киснем (O_2) та радикалами, що утворюються під час згоряння.

Таблиця 1

Ентальпія утворення сполук за 298,15 K згідно довідкових даних та COMSOL Multiphisics

Сполуки	Ентальпії утворення h (кДж/моль) T = 298.15 K	Ентальпії утворення h (кДж/моль) T = 298.15 K (COMSOL)
N2	0	0
Біомаса	-110	-110
O2	0	0
H2O	-241.84	-241.82
CO	-110.54	-110.53
CO2	-393.55	-393.98

Джерело: власні обчислення

Таблиця 2

Теплоємності сполук, що приймають участь у процесі горіння біомаси за300 K та 2000 K згідно довідникових даних та даних COMSOL

Сполуки	Ср (Дж/моль/K) T = 300 K	Ср (Дж/моль/K) T = 300 K (COMSOL)	Ср (Дж/моль/K) T = 2000 K	Ср (Дж/моль/K) T = 2000 K (COMSOL)
N_2	29.075	29.142	35.987	36.368
Біомаса	28.878	28.857	34.238	34.528
O_2	29.330	29.395	37.790	37.882
H_2O	33.468	33.602	51.145	51.193
CO	29.035	29.136	33.254	36.591
CO_2	37.101	37.225	54.363	61.07

Джерело: власні обчислення

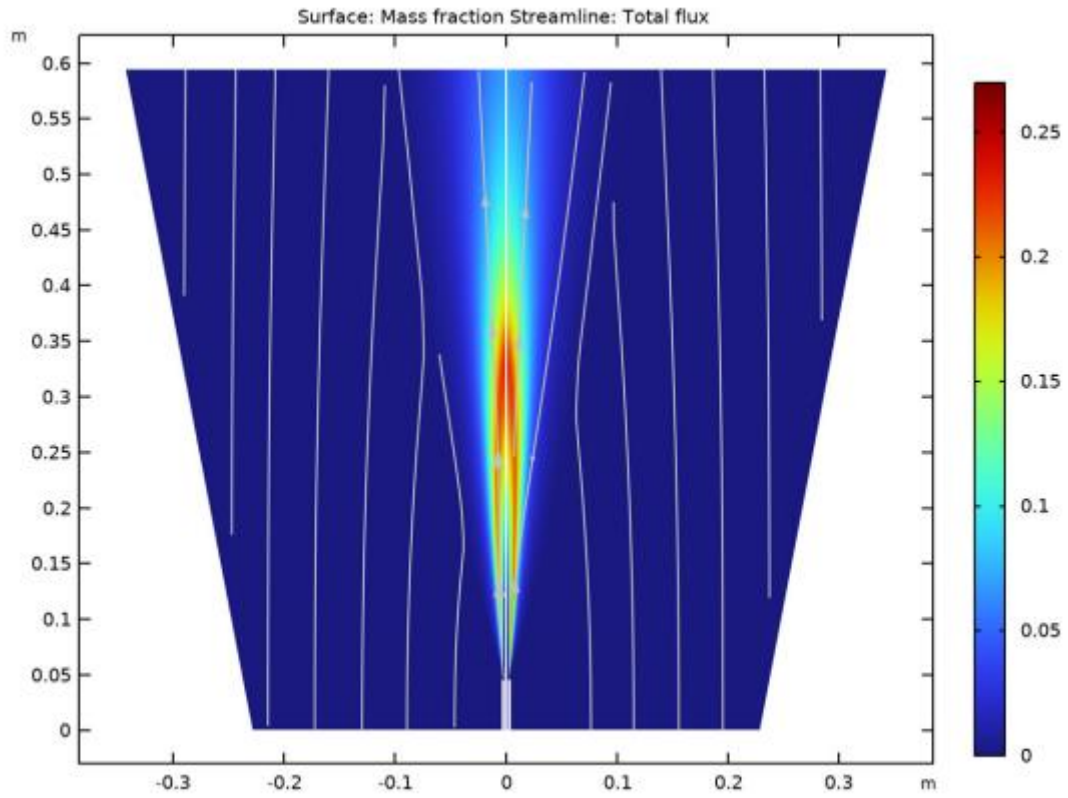

Рис. 2. Розподіл концентрацій CO_2 у процесі спалювання однієї частинки біомаси в потоці повітря
Джерело: власні обчислення

Термічний NO_x є основною складовою загального обсягу викидів оксидів азоту в умовах високотемпературного згоряння й, відповідно, головним об'єктом при розробці екологічно безпечних технологій спалювання палива [9, с. 425].

Механізм включає кілька основних реакцій, які описують перетворення молекулярного азоту на оксид азоту:

Швидкістьвизначальна реакція:

$$N_2 + O \rightleftharpoons NO + N \quad (32)$$

Послідовна реакція з киснем:

$$N + O_2 \rightleftharpoons NO + O \quad (33)$$

Допоміжна реакція з гідроксильними радикалами:

$$N + OH \rightleftharpoons NO + H \quad (34)$$

Остання реакція додається у так званому розширеному механізмі Зельдовича, що враховує додаткові радикали, особливо в умовах багатого на паливо середовища.

Кінетична модель утворення термічного NO

Рівняння швидкості утворення NO відповідно до механізму Зельдовича може бути представлене у вигляді:

$$\frac{d\mathrm{NO}}{dt} = k_1 C_{N_2} C_{\mathrm{O}} + k_2 C_{\mathrm{N}} C_{O_2} + k_3 C_{\mathrm{N}} C_{OH} \quad (35)$$

де: k_1, k_2, k_3 – температурозалежні константи швидкості реакцій; $C_{NO}, C_{N_2}, C_{\mathrm{O}}, C_{O_2}, C_{\mathrm{HO}}$ – концентрації відповідних реагентів у газовій фазі (моль/м³); T – температура полум'я (в К); R – універсальна газова стала.

У високотемпературному режимі константи швидкості реакцій k_1, k_2, k_3 мають експоненційну залежність від температури за законом Арреніуса:

$$k_{1,2,3}(T) = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (36)$$

Концентрацію NOx розрахуємо за моделлю Зельдовича.

$$\frac{dC_{NO}}{dt} = k_{NO} \cdot C_{O_2} \cdot C_N \cdot e^{-E/RT} \quad (37)$$

де: C_N – концентрація азоту, моль/м³; E – енергія активації реакції утворення NO, Дж/моль; R – газова стала, Дж/(моль·К); T – температура, К.

Екологічна мета процесу згоряння біомаси полягає в тому, щоб зменшити кількість шкідливих викидів у повітря, зокрема окису вуглецю (CO) та оксидів азоту (NOx). Чим менше цих

речовин утворюється в процесі згоряння, тим менший негативний вплив має котельна установка на довкілля та здоров'я людей.

Щоб досягти цього, потрібно правильно керувати умовами горіння. Наприклад, важливо контролювати кількість повітря, яке подається для згоряння. Якщо його замало – паливо не згорає повністю, і в атмосферу потрапляє багато CO. Якщо ж повітря забагато – температура падає, і також утворюються забруднюючі речовини. Тому коефіцієнт надлишку повітря K має перебувати в певних межах – не менше 0,2 і не більше 2,0. Це означає, що повітря має бути трохи більше або приблизно стільки, скільки потрібно для повного згоряння, але не в кілька разів більше.

Умови оптимізації процесу спалювання біомаси:

- $0.2 < K < 2.0$ (оптимальний надлишок повітря)
- $850^\circ\text{C} < T < 1100^\circ\text{C}$
- Введення зони догорання для зниження CO
- Вторинне повітря подається на рівні 20–30% від загального.

Дуже важливим чинником також є температура згоряння. При температурі нижче 850 °C паливо може не згоріти повністю, а при температурах вище 1100 °C посилюється утворення оксидів азоту. Тому оптимальний температурний діапазон – від 850 до 1100 °C. В цих межах можна досягти як повного згоряння, так і зменшення викидів NOx.

Ще один спосіб зменшити CO – організувати так звану зону догорання. Це спеціальна частина котла, де залишки горючих газів ще певний час перебувають при високій температурі та в присутності кисню, щоб повністю прореагувати і не потрапити в атмосферу. Також важливе значення має, як саме подається повітря в котел. Частину повітря подають як первинне (безпосередньо до палива), а іншу частину – як вторинне (у зону догорання). Якщо подати 20–30% повітря як вторинне, це дає змогу краще змішувати кисень з леткими речовинами і зменшити концентрацію CO у вихлопі. Таким чином, екологічно чисте спалювання біомаси – це не лише спалити паливо, а також забезпечити оптимальні температурні режими з точним співвідношенням повітря. Граничні умови: концентрація CO: $\min C_{CO}$, концентрація NOx: $\min C_{NOx}$

Представлена математична модель дозволяє дослідити вплив технологічних параметрів котельної установки на якість згоряння біомаси та формування шкідливих викидів. Модель може бути основою для чисельного моделювання, наприклад, у COMSOL Multiphysics, ANSYS Fluent або MATLAB та подальшої оптимізації роботи котлів із метою зниження екологічного навантаження.

Висновки. У ході проведеного дослідження було побудовано математичну модель процесу згоряння біомаси, що враховує послідовні стадії: сушіння, піроліз, окиснення летких речовин і згорання вуглецевого залишку. Рівняння масота теплообміну були зведені в єдиний комплекс, який дозволяє оцінити динаміку маси компонентів палива та температури частинок у реальному часі. Особливу увагу приділено процесам, що найбільше впливають на утворення шкідливих викидів, зокрема окису вуглецю (CO) та оксидів азоту (NO_x). У математичній моделі враховано ключові фактори, які визначають екологічну ефективність згоряння. Серед них: температура в камері згоряння, коефіцієнт надлишку повітря λ, спосіб подачі первинного та вторинного повітря, а також час перебування газів у зоні догорання. Оптимізація цих параметрів дозволяє мінімізувати викиди CO і NO_x без істотного зниження енергоефективності процесу. Зокрема, встановлено, що в межах температурного діапазону 850–1100 °C та при λ = 1.2–1.5 утворення оксидів азоту значно зменшується за рахунок обмеження термічного механізму (механізму Зельдовича). Водночас зона догорання з достатньою подачею вторинного повітря (20–30%) ефективно знижує концентрацію CO. Побудована модель також дозволяє проводити сценарне моделювання – наприклад, оцінювати вплив зміни вологості палива, швидкості подачі біомаси або умов теплообміну на якість згоряння та рівень шкідливих викидів. Це відкриває широкі можливості для практичного застосування моделі в реальних котельних установках, зокрема для розробки адаптивних систем керування процесом горіння. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні енергоефективних і екологічно безпечних котлів, які працюють на відновлюваній сировині. Урахування особливостей згоряння біомаси, на відміну від традиційного викопного палива, дозволяє знизити навантаження на довкілля. Крім того, це сприяє розвитку низьковуглецевих технологій у сфері теплогенерації.

Список літератури:

1. Adoption of strategies for clean combustion of biomass in boilers / S. Sharma et al. *Corrosion reviews*. 2021. URL: https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0095.
2. Backa A., Nosek R., Čaja A. The analytical model of biomass combustion. *MATEC web of conferences*. 2020. Vol. 328. P. 04003. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/202032804003.
3. Bala-Litwiniak A., Musiał D. Computational and experimental studies of selected types of biomass combustion in a domestic boiler. *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 14. P. 4826. URL: https://doi.org/10.3390/ma15144826.
4. Characteristics of trace elements and potential environmental risks of the ash from agricultural straw direct combustion biomass power plant / S. Xu et al. *Chemosphere*. 2023. Vol. 333. P. 138989. URL: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138989.
5. Computerized analysis of low-nox coal-fired utility boilers / B. Epple et al. *Clean combustion technologies*. London, 2024. P. 155–173. URL: https://doi.org/10.1201/9781003539322-11.
6. Dynamic modeling and coupling characteristics analysis of biomass power plant integrated with carbon capture process / Z. Zhang et al. *Energy conversion and management*. 2022. Vol. 273. P. 116431. URL: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116431.
7. Numerical study of co-firing lignite and agricultural biomass in utility boiler under variable operation conditions / A. Milićević et al. *International journal of heat and mass transfer*. 2021. Vol. 181. P. 121728. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121728.
8. Optimizing biomass combustion in a 130 t/h grate boiler: assessing gas-phase reaction models and primary air distribution strategies / X. Su et al. *Applied thermal engineering*. 2024. Vol. 238. P. 122043. URL: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122043.
9. Ruyck J., Distelmans M. Comparative study on emissions from gas fired and oil fired residential boilers. *Clean combustion technologies*. London, 2024. P. 423–437. URL: https://doi.org/10.1201/9781003539322-27.
10. The study of characteristics through biomass burning / D. Zhang et al. *E3S web of conferences*. 2020. Vol. 218. P. 04027. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021804027.

Pravovierov A.O. MODELING OF THE BIOMASS COMBUSTION PROCESS IN A BOILER PLANT TO IMPROVE ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

In the context of the transition to renewable energy sources, biomass combustion in boiler plants is becoming relevant as an alternative to traditional fuels. The work is devoted to the mathematical modelling of the biomass combustion process in a boiler plant, taking into account the main stages of thermal decomposition of fuel. The relevance of this study lies in the need to reduce the level of harmful emissions in heat generation processes that utilise biomass. The purpose of this work was to model the physicochemical processes of biomass combustion in a boiler plant, aiming to enhance the environmental safety of utilising renewable energy resources. The article presents mathematical models of the biofuel combustion process in a boiler plant, taking into account the phase transformations of the fuel at the stages of drying, pyrolysis, oxidation of volatile compounds and combustion of carbon residue. The developed model included material balance equations, heat transfer in burning biomass particles and kinetic equations. The impact of technological process parameters on the formation of carbon monoxide (II) and nitrogen oxides NOx was assessed. Particular attention is paid to the role of the excess air coefficient, temperature in the combustion chamber, as well as the ratio of primary and secondary air in the formation of harmful emissions. The proposed mathematical model is based on a system of first-order differential equations. The system of equations included the kinetics of changes in the mass of moisture, volatile components and carbon residue during the combustion of biomass. To describe the processes of nitrogen oxide formation, the Zoldovich mechanism was used, which takes into account the temperature dependence of the rate of chemical reactions involving molecular nitrogen and oxygen. The developed model allows us to reproduce the real operating conditions of boiler plants operating on biomass, taking into account the continuous supply of fuel to the combustion chamber. Optimal control modes for the boiler plant are proposed, with an excess air λ of 1.2–1.5, provided that the temperature inside the combustion chamber is maintained within the range of 850–1100°C. The proposed parameters of the plant operation will contribute to minimising CO and NOx emissions in flue gases.

Key words: *biomass combustion, boiler plant, mathematical modelling, environmental safety, heat balance, gas emissions.*

Дата надходження статті: 14.07.2025
Дата прийняття статті: 21.07.2025
Опубліковано: 27.10.2025