

Брунеткін О.І.

<https://orcid.org/0000-0002-6701-8737>

Національний університет «Одеська політехніка»

Музика Д.О.

<https://orcid.org/0009-0002-4081-2209>

Національний університет «Одеська політехніка»

Тафій В.В.

<https://orcid.org/0009-0004-6556-8964>

Національний університет «Одеська політехніка»

ІМІТАЦІЙНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГАЗИФІКАЦІЇ ОРГАНІЧНОЇ СИРОВИНИ

Розглядаються питання організації процесу повільного піролізу органічних речовин в загальному випадку невідомого і змінного складу. Актуальність роботи визначається розглядом можливості використання різних органічних відходів (побутових, сільськогосподарських, промислових) без їх попереднього сортування і сушіння для отримання вторинних енергетичних ресурсів відомого (контрольованого) складу. Новизна роботи обумовлена розробкою моделі методу контрольованого піролізу або газифікації органічних речовин з мінімальною кількістю твердих залишків при максимальній теплотворній здатності одержуваної суміші горючих газів.

Розроблено імітаційну математичну модель установки термодеструкції органічних речовин, яка базується на її конструктивному та технологічному описі і дозволяє досліджувати динамічні властивості процесу. Основні канали регулювання моделі можна розглядати як інерційну ланку першого порядку з транспортним запізнюванням. Параметри цієї ланки, такі як сталий час і величина запізнення, залежать від геометричних розмірів установки і потребують індивідуальної настройки для кожного конкретного об'єкта.

Встановлено, що на етапі моделювання існують режими роботи, за яких система може переходити зі стійкого стану в нестійкий унаслідок наявності позитивного зворотного зв'язку. Цей ефект визначається співвідношенням між витратами вихідної сировини та витратою рециркуляційного газу. Водночас наявність регуляторів дозволяє стабілізувати технологічний процес піролізу на заданих значеннях основних параметрів.

Показано, що для моделювання автоматичної системи керування достатньо застосовувати одноконтурні регулятори. Вимкнення будь-якого з регуляторів призводить до погіршення якості регулювання, проте система загалом зберігає стабільність функціонування, що свідчить про її робастність і резерви регулювальної стійкості.

Запропоновано схему моніторингу складу сировини в режимі реального часу в процесі піролізу (газифікації). Знання складу дозволяє контролювати процес його переробки з метою: а) організації оптимального процесу газифікації з метою максимізації кількості та енергетичної цінності суміші газоподібних продуктів реакції; б) контролю витрати переробленої сировини для отримання необхідної кількості газоподібного продукту в будь-який заданий момент часу.

Ключові слова: термохімічна конверсія, органічна речовина, керований піроліз, імітаційна математична модель, комбінований газогенератор

Вступ. Одним із важливих аспектів сучасних екологічних проблем є утилізація побутових, сільськогосподарських та інших органічних відходів. Зі зростанням їхніх обсягів можливості полігонів

для складування стрімко вичерпуються, що спричинило кризову ситуацію. Згідно з ухваленою «дорожньою картою», до 2035 року державам ЄС дозволятиметься захоронювати на полігонах



не більше 10% комунальних відходів. Для досягнення цього показника активно впроваджують системи сортування сміття, які дозволяють значну його частину спрямовувати на ресайклінг та компостування. Однак, навіть за умови таких заходів, майже половину відходів нині, як і в перспективі, доводиться спалювати – або безпосередньо, або з отриманням енергії.

Термічне знищення відходів сьогодні залишається одним із найбільш забруднювальних методів їх перероблення, проте наразі йому практично немає альтернативи. Однією з ключових причин високої забрудненості викидів сміттеспалювальних заводів є нестабільний та непередбачуваний склад відходів, що надходять на спалювання. Через це неможливо забезпечити точне й кероване подавання повітря, необхідне для оптимізації процесу горіння та зменшення шкідливих викидів.

Раніше був запропонований метод визначення змінного і невідомого складу горючих газів в режимі реального часу в процесі їх спалювання [1]. Цей метод дозволяє організувати оптимально керований процес спалювання таких газів з мінімальним забрудненням навколишнього середовища. Одним із шляхів зменшення забруднення навколишнього середовища при спалюванні твердих органічних відходів може служити попередня їх газифікація з подальшим використанням методу, викладеного в [1]. Таким чином, актуальною є організація процесу повної газифікації органічних речовин із збереженням максимально можливої теплотворної здатності утвореної суміші газів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із факторів забруднення навколишнього середовища при розміщенні органічних відходів на полігонах (звалищах) є виділення метану. За твердженням Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату ООН (IPCC) [2], парникова активність метану в розрахунку на 100 років у 28 разів сильніша, ніж у вуглекислого газу того ж обсягу, що утворюється при спалюванні метану. У 20-річній перспективі ця величина ще більша – у 84 рази.

Об'єднуючою особливістю більшості робіт, пов'язаних з газифікацією органічної сировини, є розгляд в якості вихідних різних, але обов'язково відомих вихідних речовин. На противагу цьому в реальній ситуації практично важливим є випадок непередбачуваної зміни в процесі переробки складу сировини.

Основним способом отримання енергії з органічної сировини традиційно залишається її спа-

лювання, хоча в технологічному ланцюзі можуть застосовуватися й інші процеси – газифікація та піроліз. Продукти цих проміжних стадій у підсумку також підлягають спаленню. Історично дослідження у сфері спалювання, газифікації та піролізу розвивалися незалежно одне від одного, у різні періоди та різними науковими школами. Вони спиралися на різні типи вихідних матеріалів і переслідували різні цілі. Так, у процесах спалювання увага зосереджувалася на досягненні максимального тепловиділення шляхом мінімізації недопалу й уникнення надлишку повітря. На відміну від цього, газифікація спрямована на зниження енергетичних втрат і отримання газової суміші з максимально можливою теплотворною здатністю. Піроліз же потребує підведення тепла й приводить до утворення твердого вуглецевого залишку, конденсованих і неконденсованих газоподібних продуктів. Таким чином, кожен із цих напрямів використовує власні підходи та моделі.

У оглядовому дослідженні [3] відображено внесок європейських та американських наукових груп у розвиток зазначених технологій. Водночас автори цієї роботи пропонують розглядати всі процеси у межах єдиної класифікації «термохімічної обробки біомаси», що створює певну методологічну суперечність щодо різної природи цих процесів та їхніх цілей. Проблематика пошуку альтернативних джерел енергії та шляхів утилізації відходів залишається актуальною в усьому світі [4].

У низці робіт наголошується на можливості плавного переходу одного процесу в інший або їх комбінованого протікання в межах одного обладнання. Наприклад, у роботі [5] газифікацію розглядають як окремий випадок спалювання, що передбачає можливість використання єдиної моделі для опису різних варіантів термічної переробки біомаси за умови зміни коефіцієнта надлишку окиснювача. Це обумовлює необхідність вивчення проміжних та комбінованих режимів [6]. В іншому дослідженні [7] аналізується варіант протікання піролізу в присутності невеликої кількості повітря, так званий «квазіпіроліз». Подібні умови можуть виникати на одному й тому самому обладнанні при використанні однакового вихідного матеріалу, що створює складності у застосуванні моделей, призначених окремо для піролізу чи газифікації. Проблема особливо загострюється за неконтрольованих змін складу сировини чи випадкових підсмоктувань повітря.

Додаткову складність становить велика кількість чинників, що впливають на перебіг піролізу.

У наукових публікаціях їх зазвичай розглядають окремо або в обмежених комбінаціях [8–9], що пояснюється різноманіттям вихідних матеріалів, конфігурацій реакторів та режимних параметрів процесу. Це підкреслює багатовимірність проблематики та необхідність комплексних підходів для її подальшого вивчення.

Проблеми, що виникають, можуть бути вирішені при використанні пристрою, що дозволяє одночасно реалізовувати як процеси піролізу, так і газифікації. Таким чином, актуальною є розробка моделі такого пристрою та його управління.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка схеми та моделі процесу газифікації органічної сировини при забезпеченні максимально можливої теплотворної здатності суміші газів, що утворюється.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- визначити можливу схему установки;
- розробити єдину модель для вирішення завдань спалювання, газифікації та повільного піролізу при змінному і невідомому складі вихідних вуглеводневих речовин.

Виклад основного матеріалу. Схема установки і модель процесу спалювання, газифікації та повільного піролізу вуглеводневих речовин невідомого і змінного складу

Схема установки. Принципова схема (рис. 1) побудована на основі установки, описаної в [10].

На рис. 1 наведено принципову схему газогенератора (ГГ), запропонованого для подальшого аналізу. Корпус установки виконано у вигляді єдиної конструкції, що складається з трьох функціонально взаємопов'язаних частин. У частині 1а розміщено зону горіння та газифікації, у частині 1b – зону піролізу деревних відходів, а частина 1c призначена для газифікації органічної сировини довільного складу.

Незважаючи на конструктивну ідентичність зон 1b і 1c, режими та параметри процесів, що в них реалізуються, істотно відрізняються. У зоні 1b формуються умови для піролізу деревини за відсутності або мінімальної подачі повітря, основною метою якого є отримання максимально можливої кількості деревного вугілля. Утворене вугілля подається до зони 1а та використовується як основний робочий продукт для процесів горіння і газифікації.

У зоні 1c, навпаки, створюються умови для максимально повної газифікації органічної сировини з утворенням мінімально можливого об'єму карбонізованих залишків. Шлакові відходи, що

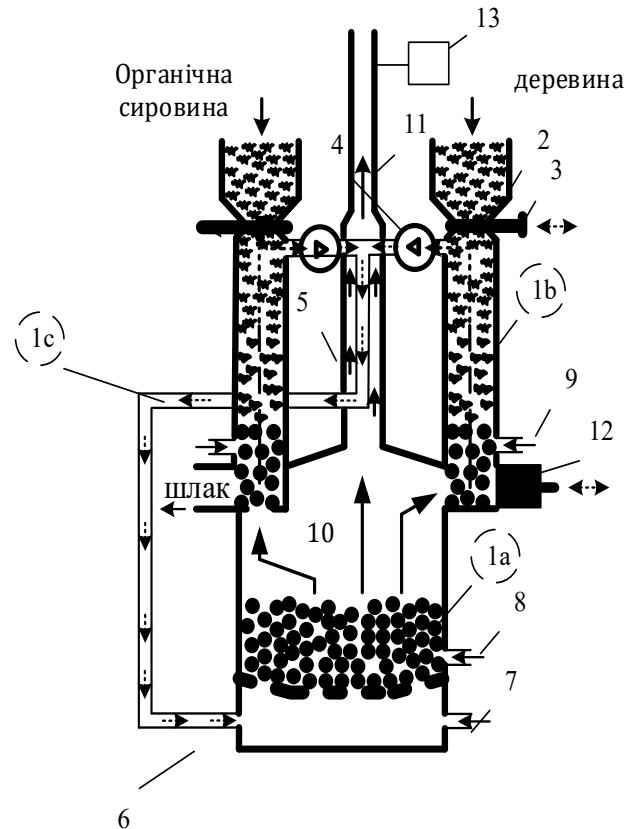


Рис. 1. Принципова схема

формується в цій зоні, видаляються з установки з подальшим захороненням на полігонах або використанням у виробництві будівельних матеріалів. За фізико-хімічною природою процеси, що відбуваються в зонах 1b і 1c, є подібними, тому взаємодію елементів установки доцільно розглядати на прикладі зон 1a та 1b.

Вихідна сировина надходить у зону піролізу з бункера 2 через клапан 3 з витратою G_0 . Газоподібні продукти піролізу за допомогою вентилятора (димососа) 4 через теплообмінник 5 подаються в нижню частину 6 зони горіння і газифікації. Подача окислювача може здійснюватися в різні ділянки 7 і 8 зони горіння та газифікації, а також у ділянку 9 нижньої частини зони піролізу, що є можливими, але не обов'язковими точками введення.

У результаті протікання реакцій на виході з реактора через колектор 11 утворюється гарячий продукт-газ із витратою Q_2 , який надходить до загальної газорозподільної системи.

У межах цієї системи продукт-газ розподіляється на два потоки: основний потік з витратою Q_4 спрямовується до споживача, тоді як другий потік з витратою Q_3 по лінії рециркуляції повертається в реактор. процесу.

Частина утворених газів із верхньої частини 10 зони газифікації спрямовується в зону піролізу, забезпечуючи теплову та газову взаємодію між зонами. Інша частина газів надходить у теплообмінник 5, після чого через вихід 11 подається до споживача.

Принцип роботи установки розглянемо на прикладі використання деревних відходів як вихідної сировини. Після виходу газогенератора на заданий режим у зоні горіння і газифікації 1а підтримується висока температура шару деревного вугілля, необхідна для стабільного протікання процесів. Підтримання температурного режиму може здійснюватися кількома способами: шляхом безпосереднього продовження горіння деревного вугілля при подачі окислювача через ділянку 8; шляхом часткового окислення (спалювання) частини піролізних газів, що надходять у нижню частину 6, при подачі окислювача через ділянку 7 з подальшим проходженням продуктів горіння крізь шар деревного вугілля; а також шляхом комбінованого використання зазначених способів.

У міру карбонізації деревних відходів утворене деревне вугілля з нижнього сегмента зони піролізу 1b за допомогою пристрою 12 подається до зони 1а, де воно залучається до процесів горіння і газифікації. Одночасно з бункера 2 через клапан 3 здійснюється безперервне або періодичне поповнення піролізної частини 1b газогенератора новою порцією вихідної сировини.

У процесі експлуатації газогенератора керування режимами роботи може здійснюватися за рахунок зміни продуктивності димососа 4, що впливає на інтенсивність відведення та рециркуляції газів; варіювання місць подачі окислювача (7, 8 або 9), їх комбінації та об'ємів поданого окислювача; а також регулювання об'єму і швидкості подачі деревного вугілля з нижнього сегмента зони 1b у зону 1а і швидкості подачі вихідної сировини з бункера 2.

Синтез системи керування установкою. Для керування та оптимізації роботи піролізної установки розроблено імітаційну математичну модель, яка описує її динамічні властивості за допомогою багатоканальної структури. Модель відображає взаємозв'язки між основними вхідними та вихідними параметрами процесу піролізу–газифікації і дає змогу аналізувати вплив керуючих дій на режим роботи установки.

Перший канал моделі встановлює залежність між витратою повітря Q_1 та витратою продукту-газу Q_2 і використовується для контролю інтен-

сивності окисних реакцій у процесі піролізу–газифікації. Другий канал пов'язує витрату вихідної сировини G_{\square} з витратою продукт-газу Q_2 , що дозволяє регулювати швидкість та глибину розкладання сировини. Третій канал описує вплив витрати рециркуляційного газу Q_3 на витрату продукт-газу Q_2 і призначений для підтримання заданого рівня реакцій у системі.

Наступні три канали відображають вплив витрат повітря Q_1 , вихідної сировини G_{\square} та рециркуляційного газу Q_3 на температуру піролізу. Це забезпечує можливість контролю та регулювання температури процесу t з метою створення оптимальних умов розкладання сировини та формування продуктів із заданими характеристиками. Останні два канали встановлюють зв'язок між витратою повітря Q_1 , витратою вихідної сировини G_{\square} та складом продукт-газу, що є важливим для забезпечення стабільних якісних показників кінцевого продукту. Параметричну схему моделі наведено на рис. 2.

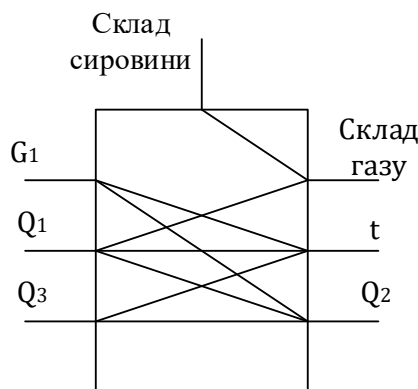


Рис. 2. Параметрична схема

Піролізна установка за конструктивними та тепломасообмінними характеристиками має значну подібність до топок з киплячим шаром. Як правило, динамічні характеристики таких систем визначаються на основі рівнянь збереження маси та енергії. Аналогічний підхід може бути застосований і для піролізної установки, для якої доцільно записати відповідні балансові співвідношення.

Для піролізної установки можна записати:

$$\frac{dT_L}{dt} S_L \rho_L c_L H_L = G_w Q_w^p + Q_1 h_1 + Q_3 Q_n^p - Q_2 Q_n^p - I_{ash} - I_R \quad (1)$$

де T_L – температури шару та газу; ρ_L, ρ_g – насипні щільності шару та газу; H_L – висота шару; S_L – площа дзеркала реакції; G_w – витрата сировини (шихти); C_L, C_g – теплоємність матеріалу шару та газу; Q_w^p – теплотворна здатність сировини.

вини; Q_n^p – теплотворна здатність синтезу газу та рециркуляційного газу; I_{ash}, I_R – втрати теплоти з золою і випромінюванням; Q_1, Q_2, Q_3 , – витрата повітря, продукт-газу, рециркуляційного газу.

Після того, як складові рівняння (1) представлені у вигляді прирощень, рівняння набуває наступного вигляду:

$$\frac{dT_L}{dt} S_L \rho_L c_L H_L = \Delta G_w \bar{Q}_n^p + \bar{G}_w \Delta Q_n^p + \Delta Q_1 \bar{c}_1 \bar{T}_1 + \Delta Q_3 \bar{c}_L \bar{T}_L + \bar{Q}_3 \bar{c}_L \Delta T_L - \Delta Q_2 \bar{c}_L \bar{T} - \bar{Q}_2 \bar{c}_L \Delta T_L \quad (2)$$

або

$$\begin{aligned} \frac{S_L \rho_L H_L}{\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3} \frac{dT_L}{dt} + \Delta T_L = \frac{\bar{c}_w (T_L - \bar{T}_w)}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta G_w + \\ + \frac{\bar{G}_1}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_n^p + \frac{\bar{c}_1 (T_L - \bar{T}_1)}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_1 + \\ + \frac{\bar{T}_L}{(\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_3 - \frac{\bar{T}_L}{(\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Рециркуляційний газ являє собою частину продукт-газу, яка повертається до установки з метою повторного використання в технологічному процесі. За своїми енергетичними характеристиками він має таку саму теплотворну здатність, як і основний продукт-газ, а його параметри визначаються температурним режимом процесу піролізу.

З огляду на це регульований об'єкт, що описує взаємозв'язки в каналах « $Q_3 - T_L$ », « $Q_2 - T_L$ », « $Q_1 - T_L$ » та « $G_w - T_L$ », доцільно моделювати у вигляді інерційної ланки першого порядку з транспортним запізнюванням. Наявність запізнювання зумовлена скінченною довжиною трубопроводів, через які здійснюється подача та відведення газових потоків, що призводить до часової

затримки між зміною керуючих впливів і відповідною реакцією температури в системі.

Із закону збереження маси випливає:

$$\frac{dm}{dt} = G_w + Q_1 + Q_3 - Q_2, \quad (4)$$

З рівняння (4) з урахуванням положень хімічної кінетики досліджуваного процесу випливає, що регульований апарат за каналами « $Q_1 - Q_2$ », « $G_w - Q_2$ » та « $Q_3 - Q_2$ » доцільно розглядати як інерційну ланку. Інерційні властивості системи зумовлені швидкістю поширення фронту термодеструкції вихідної сировини в реакційному об'ємі.

Зв'язки між вхідними та вихідними параметрами передавальних функцій наведено в табл. 4.1. Значення відповідних коефіцієнтів отримано на основі розрахунків процесу піролізу з урахуванням режимних і конструктивних параметрів установки.

Оскільки формула для розрахунку бруто-виходу продукт-газу за структурою збігається з формулою для вихідної сировини та залежить від кількості поданого повітря, склад утвореного газу визначається як складом сировини, так і об'ємом повітря, що подається в реакційну зону. Для кількісної оцінки складу продукт-газу обрано параметр його теплотворної здатності. Теплотворна здатність газу залежить від співвідношення між витратами сировини та повітря, причому за певних значень цього співвідношення її зміна має нелінійний характер.

У результаті реалізації такого регульованого процесу, в якому керування здійснюється за каналами «витрата повітря – склад газу» та «витрата сировини – склад газу», нелінійні властивості системи істотно впливають на кінцевий склад

Таблиця 1

Зв'язки між вхідними та вихідними параметрами передавальних функцій

	витрата повітря Q_1 , моль/с	витрата сировини G_1 , моль/с	витрата рециркуляційного газу Q_3 , моль/с	теплотворна здатність сировини Q_n^p
витрата продукт-газу Q_2 , моль/с	$W(s) = \frac{1}{T_1 s + 1}$	$W(s) = \frac{1}{T_1 s + 1}$	$W(s) = \frac{1.83}{T_1 s + 1}$	–
температура піролізу T_L , К	$W(s) = \frac{600}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{300}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{300}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{200}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$
Теплотворна здатність продукт-газу Q_n^p	$W(s) = \frac{k \left(\frac{Q_2}{G_1} \right)}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{k \left(\frac{Q_2}{G_1} \right)}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$	–	$W(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$

продукт-газу та його теплотворну здатність. Аналіз результатів експериментальних і розрахункових досліджень показав, що лінійні моделі не забезпечують адекватного опису цих залежностей у всьому діапазоні робочих режимів.

З урахуванням виявленого характеру взаємозв'язку між параметрами процесу було прийнято квадратичну залежність теплотворної здатності продукт-газу від співвідношення витрат вихідної сировини та повітря, яка дозволяє коректніше відобразити нелінійну поведінку системи та підвищити точність математичної моделі:

$$Q_H^p = Q_{H0}^p \left(1 - k(Q_1 - G_u V_0)^2 \right), \quad (5)$$

де Q_H^p – теплотворна здатність продукт-газу; V_0 – об'єм повітря необхідний для піролізу 1 моль вихідної сировини. Залежить від складу сировини; Q_{H0}^p – максимально можлива теплотворна здатність, що залежить від складу вихідної сировини, на даному етапі прийнято $Q_{H0}^p = 1$; k – коефіцієнт пропорційності, який визначається розрахунковим або експериментальним шляхом для конкретного складу сировини. На цьому етапі прийнято $k = 0.2$.

Проведені дослідження показали, що енергетична ефективність процесу піролізу визначається насамперед двома ключовими параметрами – витратою вихідної сировини та її теплотворною здатністю. Зі збільшенням витрати сировини, а також зі зростанням її теплотворної здатності, підвищується кількість енергії, що виділяється внаслідок окисних реакцій у процесі піролізу.

Зазначений взаємозв'язок має суттєвий вплив на тепловий баланс установки та режими її роботи. Для кількісного опису цієї залежності була сформульована математична модель, яка базується на відповідних рівняннях і враховує спільний вплив витрати сировини та її теплотворної здатності на інтенсивність енерговиділення і, відповідно, на ефективність процесу піролізу:

$$Q = \bar{Q}_i^p \cdot \Delta G_1 + \bar{G}_1 \cdot \Delta Q_i^p + \Delta Q_i^p \cdot \Delta G_1. \quad (6)$$

Експериментальні дослідження показали, що значення сталих часу та величини запізнення в системі керування істотно залежать від геометричних параметрів установки та конструктивних особливостей обладнання, у зв'язку з чим вони мають визначатися індивідуально для кожної конкретної піролізної установки. На поточному етапі досліджень для проведення імітаційного моделювання були прийняті значення сталих часу, що узгоджуються з експериментальними даними, отриманими в попередніх роботах, а саме:

$T_1 = 400$ с, $T_2 = 500$ с та параметр транспортного запізнення $\tau = 10$ с.

У процесі моделювання об'єкта керування було встановлено, що через канал « $Q_3 - Q_2$ » можливе виникнення режимів роботи, за яких система переходить зі стійкого стану в нестійкий. Це зумовлено наявністю позитивного зворотного зв'язку, що формується при певних умовах функціонування установки. Поведінка об'єкта керування за цим каналом визначається співвідношенням між витратою вихідної сировини G_{\square} та витратою рециркуляційного газу Q_3 , що необхідно враховувати при синтезі та налаштуванні системи автоматичного керування.

На рисунках 3–6 наведено результати моделювання процесів регулювання за умов дії різних збурень, зокрема зміни витрати продукт-газу та зміни складу вихідної сировини. До розглянутих збурювальних впливів належать зміна витрати продукт-газу, виражена в моль/с, а також відхилення теплотворної здатності вихідної сировини на ± 20 % від номінального значення.

Зазначені збурення можуть прикладатися як окремо, так і в різних комбінаціях, що дозволяє оцінити чутливість системи керування до кожного з факторів і їх сумарного впливу. Подані на графіках результати відображають перехідні процеси регулювання у випадку одночасної дії всіх збурень, що відповідає найбільш несприятливим умовам експлуатації та дає змогу комплексно оцінити динамічні властивості та робастність системи автоматичного керування.

Наведені результати демонструють коректну реакцію системи управління зовнішнім обуренням. Особливо ефективно її функціонування проявляється при дії обурень, спрямованих у різні боки ($\Delta Q_2 = -0,5$ моль/с, $\Delta Q_{HIII}^p = -20$ % та $\Delta Q_2 = 0,5$ моль/с, $\Delta Q_{HIII}^p = 20$ %).

Висновки. Розроблено імітаційну математичну модель установки термодеструкції органічних речовин, яка базується на її конструктивному та технологічному описі і дозволяє досліджувати динамічні властивості процесу. Основні канали регулювання моделі можна розглядати як інерційну ланку першого порядку з транспортним запізненням. Параметри цієї ланки, такі як сталий час і величина запізнення, залежать від геометричних розмірів установки і потребують індивідуальної настройки для кожного конкретного об'єкта.

Встановлено, що на етапі моделювання існують режими роботи, за яких система може переходити зі стійкого стану в нестійкий унаслідок

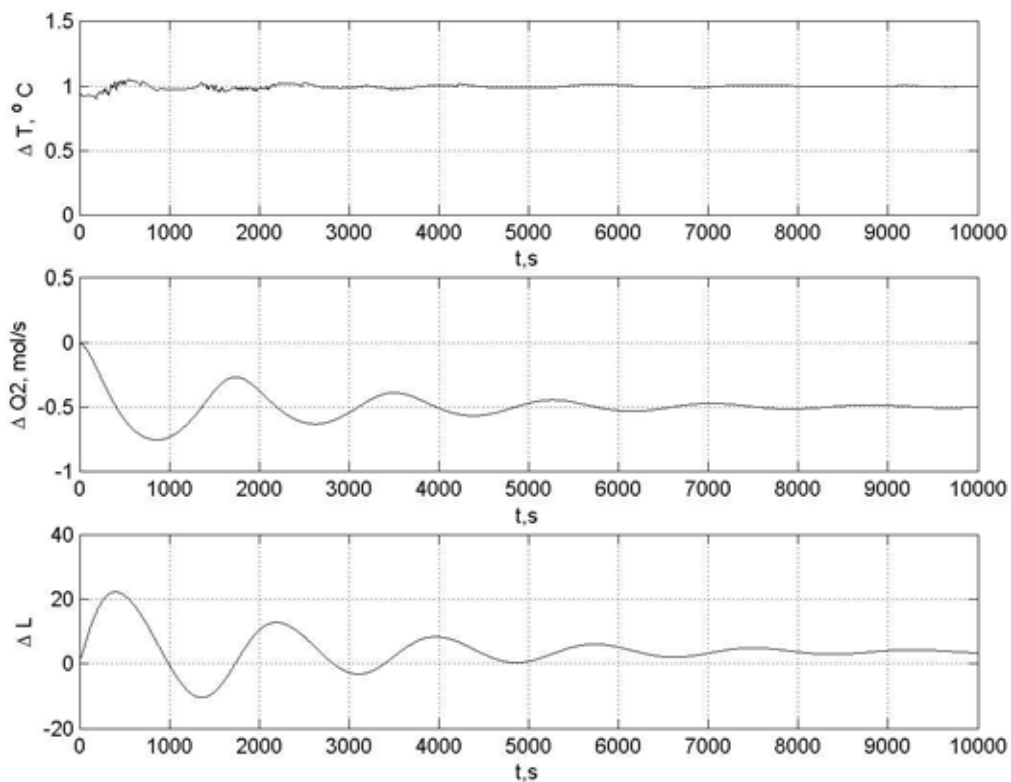


Рис. 3. Відхилення регульованих величин піролізної установки. Обурення $\Delta Q_2 = -0,5$ моль/с ,

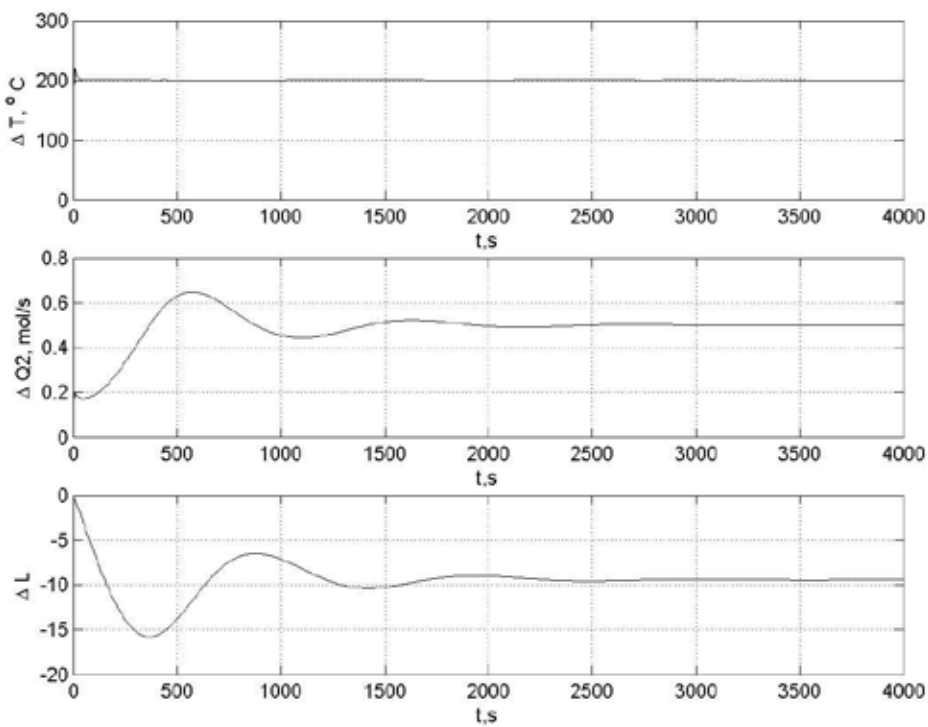


Рис. 4 Відхилення регульованих величин піролізної установки.
Обурення $\Delta Q_2 = 0,5$ моль/с , $\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = -20\%$

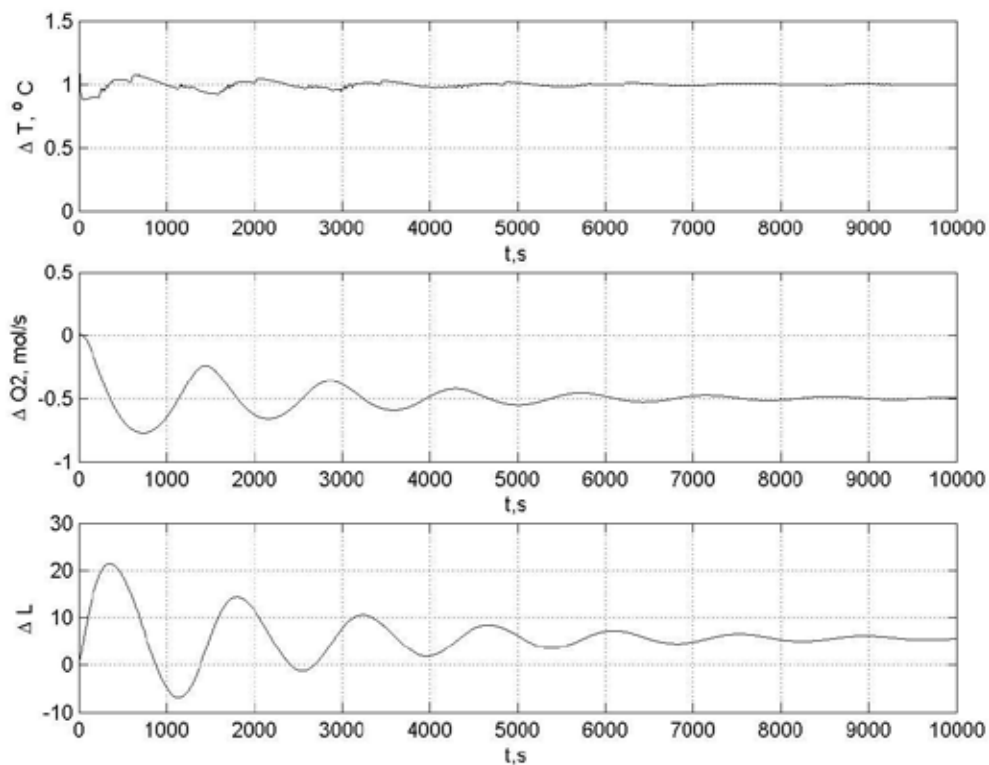


Рис. 5. Відхилення регульованих величин піролізної установки.
Обурення $\Delta Q_2 = -0,5$ моль/с, $\Delta Q_{H\ III}^p = 20\%$

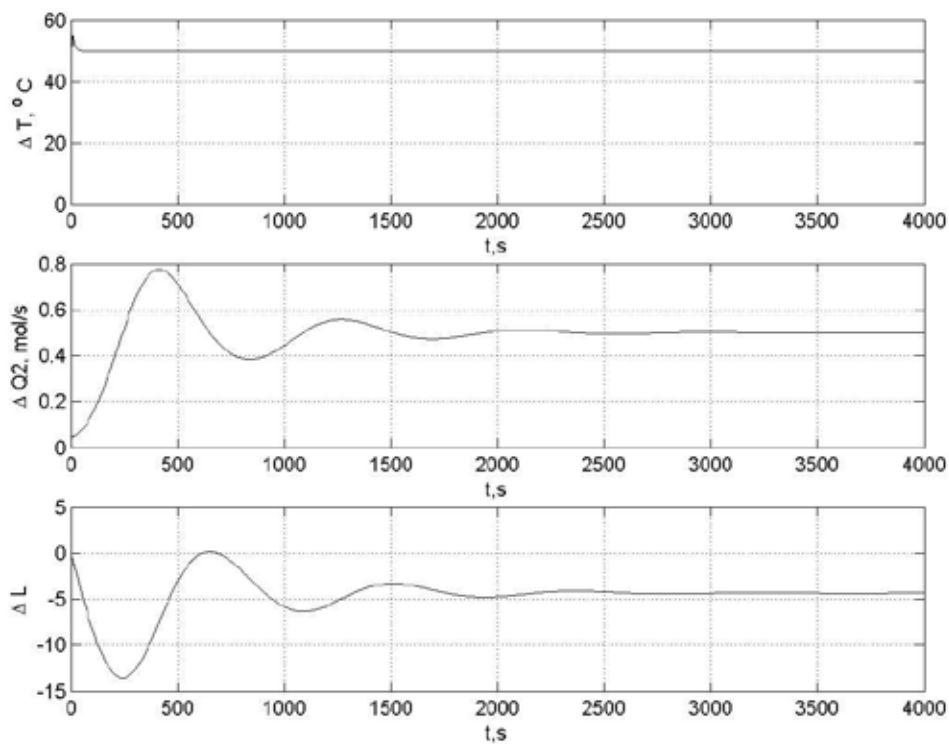


Рис. 6. Відхилення регульованих величин піролізної установки.
Обурення $\Delta Q_2 = 0,5$ моль/с, $\Delta Q_{H\ III}^p = 20\%$

наявності позитивного зворотного зв'язку. Цей ефект визначається співвідношенням між витратами вихідної сировини та витратою рециркуляційного газу. Водночас наявність регуляторів дозволяє стабілізувати технологічний процес піролізу на заданих значеннях основних параметрів.

Показано, що для моделювання автоматичної системи керування достатньо застосовувати одноконтурні регулятори. Вимкнення будь-якого з регуляторів призводить до погіршення якості регулювання, проте система загалом зберігає стабільність функціонування, що свідчить про її робастність і резерви регулювальної стійкості.

Список літератури:

1. Brunetkin O., Maksymov M. V., Maksymenko A., Maksymov M. M. (2019). Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 4/6 (100). P. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176422>
2. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
3. Brown R. C. Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power 2019, Wiley, 408 p. ISBN: 978-1-119-41757-6
4. Perrot J.-F., Subiantoro A. Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand Sustainability. 2018. 10(9). 3114. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093114>
5. Nadia H.L., Aboyade A.O., Knoetze J.H., Görgens J.F. Process Efficiency of Biofuel Production Via Gasification and Fischer–Tropsch Synthesis [Text] Fuel, Volume 109, 2013, P. 484–492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.013>
6. Sikarwar V.S., Zhao M., Clough P. and others. An overview of advances in biomass gasification Energy Environ. Sci., 2016, 9, 2939–2977. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6EE00935B>
7. Czajczyńska D., Anguilano L., Ghazal H., Krzyżyńska R., Reynolds A.J., Spencer N., Jouharaa H. Potential of Pyrolysis Processes in the Waste Management Sector Thermal Science and Engineering Progress, Volume 3, September 2017, Pages 171–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>
8. Sharuddin S.D.A., Abnisa F., Wan M.A. Wan Daud, Aroua M.K. A review on pyrolysis of plastic wastes Energy Conversion and Management 115 (2016) 308–326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
9. Huang Y.-F., Chiueh P.-T., Lo S.-L. A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass Sustainable Environment Research. Volume 26, Issue 3, May 2016, Pages 103–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.04.012>
10. Brunetkin V., Davidov V.O. Kombinovaniy sharoviy gazogenerator. [Combined gas generator with a layer] The 22th International scientific and practical conference “Modern theories and improvement of world methods” (June 06 – 09, 2023) Helsinki, Finland. International Science Group. 2023. p. 440–443. ISBN – 979-8-88992-687-0. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22>

Brunetkin O. I., Muzyka D.O., Taffi V.V. SIMULATION MATHEMATICAL MODEL OF GASIFICATION OF ORGANIC RAW MATERIALS

Addresses issues related to the organization of the slow pyrolysis process of organic substances in the general case of an unknown and variable composition. The relevance of the study is determined by considering the possibility of using various organic wastes (municipal, agricultural, industrial) without prior sorting and drying to obtain secondary energy resources of a known (controlled) composition. The novelty of the work lies in the development of a model of a method for controlled pyrolysis or gasification of organic substances with a minimal amount of solid residues and with the maximum calorific value of the resulting mixture of combustible gases.

A simulation-based mathematical model of an installation for the thermodestruction of organic substances has been developed. The model is based on the structural and technological description of the installation and makes it possible to study the dynamic properties of the process. The main control channels of the model can be considered as a first-order inertial element with transport delay. The parameters of this element, such as the time constant and the magnitude of the delay, depend on the geometric dimensions of the installation and require individual tuning for each specific object.

It has been established that, at the modeling stage, there are operating modes under which the system can transition from a stable to an unstable state due to the presence of positive feedback. This effect is determined by the ratio between the consumption of the feedstock and the flow rate of the recirculated gas. At the same

time, the presence of controllers makes it possible to stabilize the technological pyrolysis process at specified values of the main parameters. It is shown that single-loop controllers are sufficient for modeling the automatic control system.

Disabling any of the controllers leads to a deterioration in control quality; however, the system as a whole retains operational stability, which indicates its robustness and reserves of control stability. A scheme for real-time monitoring of the feedstock composition during the pyrolysis (gasification) process is proposed. Knowledge of the composition makes it possible to control its processing in order to: a) organize an optimal gasification process aimed at maximizing both the quantity and the energy value of the mixture of gaseous reaction products; b) control the consumption of the processed feedstock to obtain the required amount of gaseous product at any given moment in time.

Keywords: *thermochemical conversion, organic matter, controlled pyrolysis, simulation-based mathematical model, combined gas generator.*

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026