

МОДЕЛЮВАННЯ РЕАКТОРА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ ПРОЦЕСУ ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ПІРОЛІЗУ

Маркіна Л.М., Івашенко Т.Г., Власенко О.В., Ковтунов О.В.
Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

Вивчені результати дослідження технології циркуляційного піролізу (ЦП), спрямованої на ефективну переробку органічних відходів та полімерних матеріалів. Основна увага приділена розробці експериментальної установки для вивчення процесів піролізу в умовах замкнутого циклу. Детально описані конструктивні особливості створеного експериментального стенду, що дозволяє досліджувати вплив різних параметрів на процес термічного розкладу матеріалів.

У роботі висвітлено основні структурні компоненти установки, зокрема реакторну камеру, систему подачі сировини, нагрівальні елементи та систему збору газоподібних і рідких продуктів піролізу. Здійснено аналіз конструкційних матеріалів, використаних у розробці стенду, з метою забезпечення оптимальних умов проведення експериментів. Особлива увага приділена системі контролю температури та параметрів теплового потоку, що впливають на ефективність процесу.

Окрім експериментальних досліджень, проведено комп'ютерне моделювання теплових потоків навколо реактора, що дозволило оцінити розподіл температурних зон, визначити оптимальні режими роботи системи нагріву та розрахувати потенційні втрати енергії. Виконані теоретичні розрахунки підтвердили ефективність застосування циркуляційного піролізу для отримання високоякісних продуктів термічного розкладу, таких як синтез-газ, піролізна олія та вуглецевий залишок.

Результати досліджень демонструють перспективність використання технології ЦП для екологічно безпечної утилізації відходів та виробництва вторинної сировини. Запропонований підхід може бути застосований у промислових масштабах для мінімізації екологічного навантаження та підвищення енергоефективності процесів переробки полімерних і органічних матеріалів. *Ключові слова:* багатоконтурний циркуляційний піроліз, експериментальний стенд, полімерні відходи, теплові потоки.

Modeling of the experimental stand reactor of the circulating pyrolysis process. Markina L., Ivashchenko T., Vlasenko O., Kovtunov O.

The article presents the results of the study of circulating pyrolysis (CP) technology aimed at the efficient processing of organic waste and polymeric materials. The main attention is paid to the development of an experimental facility for studying pyrolysis processes in a closed cycle. The design features of the created experimental bench are described in detail, which allows to study the influence of various parameters on the process of thermal decomposition of materials.

The paper highlights the main structural components of the plant, in particular the reactor chamber, the raw material supply system, heating elements and the system for collecting gaseous and liquid pyrolysis products. The analysis of structural materials used in the development of the stand was carried out in order to ensure optimal conditions for conducting experiments. Particular attention is paid to the temperature control system and heat flow parameters that affect the efficiency of the process.

In addition to experimental studies, computer simulations of heat flows around the reactor were carried out, which made it possible to assess the distribution of temperature zones, determine the optimal operating modes of the heating system and calculate potential energy losses. The theoretical calculations performed have confirmed the effectiveness of circulating pyrolysis applications to produce high-quality thermal decomposition products such as synthesis gas, pyrolysis oil, and carbon residue.

The results of the research demonstrate the prospects of using CPU technology for environmentally friendly waste disposal and production of secondary raw materials. The proposed approach can be applied on an industrial scale to minimize the environmental burden and increase the energy efficiency of the processes of processing polymeric and organic materials. *Key words:* multi-circuit circulating pyrolysis, experimental bench, polymer waste, heat flows.

Постановка проблеми. Основним елементом будь-якої хіміко-технологічної системи, що складається з різних машин та апаратів, зв'язаних між собою різними зв'язками, є хімічний реактор – пристрій, у якому відбувається хімічна реакція. Вибір типу, конструкції та розрахунок реактора, а також розробка системи управління його роботою є важливими завданнями технології. Реактори, призначені для різних процесів, різняться за конструкцією, розмірами та зовнішнім виглядом. Проте, незважаючи на ці відмінності, існують загальні критерії класифікації реакторів, які полегшують систематизацію інформації про них, складання математичних моделей та вибір методів розрахунку.

Технологія ЦП, яка ґрунтується на принципі термічної рециркуляції, дозволяє утилізувати суміш органічних (полімерних) відходів, отримуючи продукти легких фракцій. Для проведення експериментальних досліджень з метою вивчення технологічних параметрів процесу БЦП, оптимізації робочих режимів обладнання та визначення технологічних залежностей, необхідно розробити експериментальну установку і змодельовати теплообмін на етапі первинної деструкції в реакторі.

Актуальність дослідження. Хімічні реактори класифікуються за кількома ключовими параметрами, які визначають їх роботу:

Рух реакційного середовища: Як рідина або газ рухаються всередині реактора, впливаючи на

перемішування та контакт реагентів (гідродинаміка) [5].

Теплообмін: Як тепло передається між реакційною сумішшю та навколишнім середовищем, впливаючи на швидкість реакції.

Фазовий склад: Чи є реакційна суміш однорідною (наприклад, тільки рідина) чи неоднорідною (наприклад, рідина та газ), що впливає на контакт реагентів [1].

Організація процесу: Як процес організований (наприклад, безперервний або періодичний), що впливає на продуктивність.

Зміна параметрів: Як параметри процесу (наприклад, температура, тиск) змінюються з часом, що впливає на швидкість реакції.

Конструктивні характеристики: Особливості конструкції реактора, що впливають на його ефективність та безпеку [9].

Реактор періодичної дії працює циклічно: всі реагенти додаються на початку, реакція протікає, а продукти виводяться після завершення. Тривалість реакції збігається з часом перебування реагентів в реакторі. Параметри процесу змінюються з часом [5].

Між циклами реакції необхідно виконувати допоміжні операції, такі як завантаження та вивантаження, що знижує продуктивність реактора, оскільки в цей час не відбувається реакція [9].

Для дослідження біохімічних процесів (БЦП) було розроблено нові типи обладнання [1,2], враховуючи результати попередніх випробувань. Описана експериментальна установка є одним із прикладів такого обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання піролізу є вагомим складовим дослідженням у галузі інженерії та екології, оскільки дозволяє оптимізувати процеси термічного розкладу органічних матеріалів, таких як полімери, біомаса та відходи.

За останні п'ять років у літературі було задокументовано сімдесят п'ять дослідницьких робіт, присвячених обчислювальному моделюванню піролізу (відповідно до пошуку в базах даних за ключовими словами: моделювання, відходи, піроліз).

Останні наукові публікації висвітлюють різні аспекти моделювання піролізу.

Джамал Уфкір, Рашид Черуакі та ін. досліджують перетворення пластикових відходів на поліетилен низької щільності (LDPE) за допомогою піролітичного палива за допомогою переривчастого реактора в лабораторному масштабі. Це дослідження зосереджено на конструкції піролізної установки, призначеної для перетворення пластикових відходів на високоенергетичне рідке паливо [5].

Шиві Гарг, Ананд Найяр та ін. досліджують різні стратегії поводження з відходами та детально обговорюється процес піролізу. Моделювання проводилося зі збереженням піролізу як основного процесу та з урахуванням різних параметрів, таких як

живлення та матеріали реактора. Були обрані різні корми, такі як поліетилен низької щільності (LDPE), пшенична солома, соснова деревина, а також суміш полістиролу (PS), поліетилену (PE) і поліпропілену (PP). Розглядалися різні матеріали реакторів, а саме: нержавіюча сталь AISI 202, AISI 302, AISI 304 і AISI 405. AISI розшифровується як Американський інститут чавуну та сталі [6].

Д. Чайчинська, Р. Кшижинська та А.Дж. Рейнольдс досліджують зв'язки між умовами піролізу, хімічним і мінералогічним складом їх продукції та перевагами піролізу в секторі поводження з відходами. Зокрема розглядається швидкий, проміжний та повільний піроліз органічних відходів та сумішей неорганічних та органічних відходів домогосподарств [7].

Ясір Маккаві, Пол Нанкерроу та ін. досліджують піроліз сировини у реакторі з киплячим шаром. Фізико-хімічні характеристики вихідної сировини компоненти були піддані швидкому піролізу і отримані баланси мас. Продукти швидкого піролізу (біоолія та газ, що не конденсується) були проаналізовані з точки зору їх хімічного складу, термогравіметричних профілів та енергетичного складу. Встановлено, що загальний розподіл продукту за масовим відсотком при температурі піролізу 525 °C становить 38,8% біоолія (включаючи 10,4% реакційної води), 37,2% біовугілля і 24,0% неконденсованого газу. Було виявлено, що загальна ефективність перетворення енергії (відношення вмісту енергії в продукті до вмісту у вихідній сировині) становить 87,0%, що свідчить про хороший потенціал перетворення відходів фіникової пальми в енергію при одночасному усуненні негативного впливу на навколишнє середовище та витрат, пов'язаних з утилізацією відходів [8].

Осанна Увітонзе, Айон Кім досліджують гідродинаміку газотвердого потоку та характеристики теплопередачі CFB (низькотемпературний піроліз), для швидкого піролізу за допомогою тривимірної (3D) ейлеріанської моделі CFD. Розглядаються параметри моделі, дзеркальність та коефіцієнти реституції частинка-частинка, для точного прогнозування гідродинаміки газотвердого потоку та розподілу тепла з урахуванням різних швидкостей газу та швидкостей циркуляції твердого тіла [9].

Людмила Маркіна вивчає проблеми утилізації промислових та побутових органічних відходів. Досліджує технології багатоконтурного циркуляційного піролізу, що гарантує екологічно чисту утилізацію твердих побутових відходів, з одержанням цінних вихідних продуктів: рідкого палива легких фракцій та електроенергії [10].

Попри те, що за останні десятиліття було досягнуто значного прогресу в експериментальних дослідженнях технології піролізу, практична вартість технології відносно висока, вимагає значних вкладень робочої сили, матеріальних ресурсів і часу.

Зі швидким розвитком комп'ютерних технологій методи чисельного моделювання стали отримувати інформацію про параметри для кожної точки вимірювання процесу термічної деструкції, і вони стали ефективним методом для прискорення розвитку технології піролізу, зменшення витрат на проектування та часу експлуатації, а також зменшення технічних ризиків [13].

В основному, всі дослідження, які зараз проводяться, спрямовані на розуміння механізмів розкладу піролізної сировини та утворення продуктів піролізу, що може сприяти розробці ефективних методів утилізації поліетиленових відходів. Ці дослідження підкреслюють важливість застосування різних методів моделювання для глибшого розуміння процесів піролізу та розробки ефективних технологій утилізації органічних матеріалів [11].

Виділення раніше нерозв'язаних аспектів загальної проблеми, на яких зосереджено увагу цієї статті. Невирішені раніше аспекти загальної проблеми, які розглядаються в цій статті, включають врахування специфіки хімічних процесів, що відбуваються у реакторах, для підвищення ефективності та безпеки виробництва, дослідження нових матеріалів, геометричних рішень та способів змішування реагентів для покращення тепломасообміну, розгляд сучасних підходів до математичного моделювання та чисельного аналізу для підвищення точності прогнозування поведінки реакційної системи, зниження енергетичних витрат та мінімізація утворення шкідливих відходів у процесі хімічного виробництва.

Ці питання є актуальними для сучасної технології піролізних процесів і вимагають подальших досліджень для підвищення ефективності та безпеки хімічних реакторів [12].

Новизна.

Розробка експериментальної установки – запропоновано новий стенд для дослідження процесу циркуляційного піролізу, що дозволяє більш точно аналізувати параметри реакції.

Впровадження циркуляційного режиму – використання технології циркуляційного руху газових та рідких продуктів піролізу для покращення тепломасообміну та підвищення ефективності процесу.

Оптимізація параметрів піролізу – визначення оптимальних температурних режимів, швидкості потоку та інших факторів для максимального виходу цільових продуктів.

Можливість масштабування – розроблені методичні підходи можуть бути адаптовані для промислового застосування, що сприяє розвитку технологій переробки органічної сировини.

Методологічне або загальнонаукове значення. Створення експериментального стенду для моделювання та вивчення параметрів процесу ЦП за допомогою програмного забезпечення ANSYS для оцінки термічних напруг і деформацій, перевірки стійкості матеріалу піролізної установки, відпрацювання робочих режимів обладнання та виявлення технологічних залежностей.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження технології ЦП створена експериментальна установка ЕУ БЦП – 14 [3] (рис. 1-2).

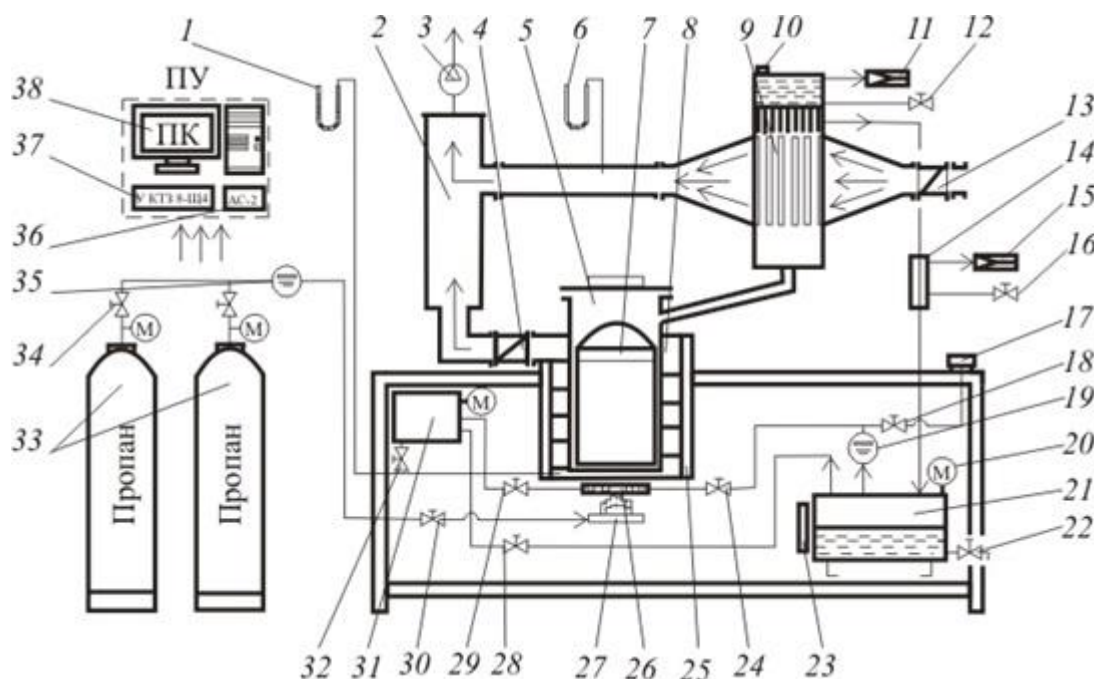


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки для термічної деструкції (БЦП)

Установка складається з:

1. *Піролізного реактора* (5): це центральний елемент установки, де відбувається піроліз. Він оснащений:

Знімною корзиною (7): для завантаження сировини.

Обігрівальним контуром (8): для підтримки необхідної температури.

Системою багато контурної циркуляції (9): забезпечує багатоступінчастий теплообмін.

2. *Системи охолодження*: для охолодження парогазової суміші (ПГС), що утворюється в реакторі:

Вихідний конденсатор (14): охолоджує ПГС.

Три контури охолодження: з кранами (12, 16) та шибером (13) для регулювання потоку охолоджувальної води та повітря.

3. *Системи збору та обробки продуктів піролізу*:

Розподільна ємність: розділяє ПГС на піролізний газ та рідку легку фракцію.

Накопичувальний бак (21): збирає піролізний газ.

Ресивер (31): збирає конденсат.

4. *Системи контролю та безпеки*:

Манометри (1, 6, 20): вимірюють тиск.

Витратоміри (11, 15): вимірюють витрату охолоджувальної води.

Газовий лічильник (19): вимірює об'єм піролізного газу.

Індикаторний пальник (17): відображає наявність піролізного газу.

Запобіжний клапан: забезпечує скидання надлишку піролізного газу в збірний бак.

Система кранів (22, 24, 28, 29, 30, 32, 34): для управління потоками газів та рідин.

Пальник допалювання (26): спалює надлишок піролізного газу.

Головний пальник (27): спалює піролізний газ.

5. *Системи автоматизації*:

АЦП (37): перетворює аналоговий сигнал на цифровий.

Декодер сигналу (36): обробляє сигнал від АЦП.
Персональний комп'ютер (38): збирає та обробляє дані з установки.

Експериментальна установка для біохімічного процесу (БЦП) складається з кількох ключових компонентів:

Піролізний реактор (5): знімна корзина дозволяє зручно завантажувати відходи для піролізу.

Багато контурна циркуляційна система (9): складається з трьох контурів, забезпечуючи ефективний теплообмін.

Вихідний конденсатор (14): охолоджує парогазову суміш (ПГС), що утворюється в реакторі.

Розподільна ємність: розділяє ПГС на піролізний газ та рідку легку фракцію.

Пульт управління: забезпечує контроль та управління роботою установки.

Установка оснащена системами безпеки:

Іскрогасник: забезпечує безпечне спалювання піролізного газу на газовому пальнику.

Запобіжний клапан: підтримує стабільний тиск в реакторі та дозволяє скинути надлишок піролізного газу в збірний бак.

Система кранів: забезпечує спалювання надлишку піролізного газу з баку на пальнику піролізного газу.

Габарити установки: 510x1285x1960 мм, що робить її досить компактною.

Піролізний реактор має циліндричну форму (діаметр 194 мм, висота 480 мм) і виготовлений з сталі марки 12X18H10T, що дозволяє йому працювати при температурах до 600 °С.

Усередині реактора розташована корзина (діаметр 184 мм, висота 400 мм), куди завантажуються відходи для піролізу. Реактор герметично закривається кришкою, що фіксується гвинтом.

Нагрівання реактора відбувається за допомогою продуктів згоряння пропанового газу, які проходять через газохід, що обвиває реактор зигзагоподібно.



Рис. 2. Фото та 3D модель установки

Це забезпечує нагрівання корпусу до температури 450-600 °С.

Для зменшення втрат тепла та забезпечення безпечної температури поверхні установки (55 °С) використовується насипний керамзит (10 мм) та мінеральна вата (50 мм), які обгортають димохід.

В процесі виготовлення установки герметичність реактора контролювалася надлишком тиску повітря до $P = 1,5 \text{ кг/см}^2$ з витримкою 30 хвилин, зниження тиску не спостерігалось.

Інтенсифікація теплообміну є одним з основних методів підвищення ефективності теплообмінного і теплотехнічного устаткування. В даний час відомі і використовуються в техніці більше двадцяти п'яти методів інтенсифікації теплообміну, серед яких найбільш поширеними є змінний градієнт тиску, шороховатість поверхні, закрутка потоку, зовнішня турбулентність і масштабні коливання потоку. Особливий клас представляють поверхневі інтенсифікатори теплообміну в формі ребер, виступів і заглиблень, що формують вихрові структури різного типу [1].

Щоб оцінити ефективність нагрівання реактора за допомогою продуктів згорання, що проходять через димохід, необхідно проаналізувати теплові потоки навколо реактора та ребер, які забезпечують його нагрівання під час спалювання пропану на головному пальнику та піролізного газу на допоміжному пальнику.

За величиною ефективності ребра зручно судити про вплив довжини ребра, теплопровідності, коефіцієнта тепловіддачі на інтенсивність використання тепла. Підвищити ефективність ребра можна, наприклад, за рахунок збільшення теплопровідності, зменшення коефіцієнта тепловіддачі, зменшення довжини ребра і збільшення його товщини.

Для інтенсифікації процесу деструкції органічної частини ТПВ у реакторі було застосовано оребрення поверхні днища та стінок реактору. Оскільки оребрення здійснюється на тій поверхні теплообміну, яка має менший коефіцієнт тепловіддачі (або великий термічний опір). Застосування оребреної

поверхні в реакторі дозволить збільшити вихід високоенергетичних продуктів.

Розглянемо оребрену поверхню даного реактору. Оребрення представляє собою підставку (круг діаметром 500 мм сталі марки ХН60ВТ ГОСТ 5632-72), яка складається з 4 листів оребрення та 2 циліндрів оребрення, що виконані зі сталі (лист 71×50) марки 12Х18Н10Т. Перший циліндр оребрення висотою 50 мм, діаметром 70 мм, має 4 отвори радіусом 8 мм для розплавленої сировини. Другий циліндр висотою 250 мм та діаметром 222 мм оребрення має 32 отвори діаметром 5 мм.

Лист оребрення висотою 250 мм, шириною 138 мм, товщиною 4 мм має 8 отворів діаметром 10 мм.

У розрізі оребрена поверхня представляє собою плоску стінку з прямими ребрами прямокутного перерізу, які зовні омиваються розплавом полімеру. Кількість ребер та матеріал для їх виготовлення було обрано згідно з урахуванням внутрішніх фізико-хімічних процесів в реакторі та конструкційними особливостями установки.

Розрахунок теплової ефективності оребреної поверхні включає в себе визначення безрозмірного коефіцієнта теплової ефективності (η) шляхом співвідношення теплового потоку днища реактору з оребренням та без нього:

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_2}$$

де Q_1 – тепловий потік днища реактору без оребрення, Вт; Q_2 – тепловий потік днища реактору з оребреною поверхнею, Вт.

Тепловий потік днища реактору без оребрення Q_1 , визначається за формулою:

$$Q_1 = q_1 * F_1 * K$$

де q_1 – густина теплового потоку днища реактору без оребрення, Вт/м²; F_1 – площа днища реактору без оребрення, м²; K – лінійний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²*К).

Густину теплового потоку у випадку лінійної залежності коефіцієнта теплопровідності від температури можна розрахувати за наступною формулою:

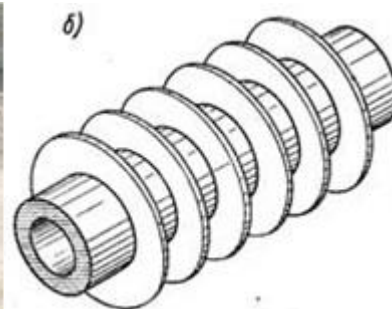
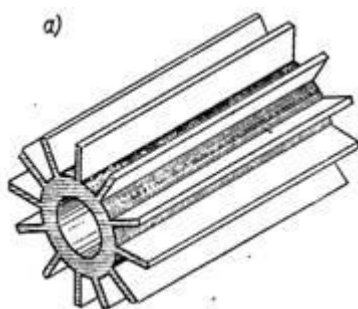


Рис. 3. Конструкції ребер: а – прямі ребра довільної конфігурації в середині реактора; б – кільцеві ребра довільної конфігурації ззовні реактора

$$q_1 = \frac{\lambda}{\delta \cdot \Delta T}$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності днища реактору, Вт/(м*К); δ – товщина днища, м; ΔT – різниця температур між зовнішньою стороною днища реактору, що підігрівається зрідженим газом з пального та димовими газами, та внутрішньою його стороною, що омивається розплавленим полімером, °С.

Оскільки реактор має форму циліндра то днище, відповідно, має форму кола. А отже площа реактору без оребрення складається з площі днища реактору та площі циліндра, яку займає розплав полімеру:

$$F_1 = \pi R^2 h + 2 \pi R$$

де R – радіус днища реактору, м; h – висота об'єму, що займає розплав полімеру.

Для максимальної тепловіддачі висота, яку займає розплав полімеру, дорівнює висоті ребра.

$$F_1 = 3,14 \cdot 0,25^2 \cdot 0,25 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 = 1,7663 \text{ (м}^2\text{)}$$

Коефіцієнт теплопередачі або коефіцієнт передачі K [Вт/м*К] розраховується для обчислення теплових втрат або теплопередачі. У даному випадку відбувається теплопередача від днища реактору до розплаву полімеру.

Враховуючи конструкційну форму реактору для визначення даного коефіцієнта використаємо формулу лінійного коефіцієнта теплопередачі для циліндричної стінки:

$$K = \frac{1}{R},$$

де R – загальний опір теплопередачі циліндричної поверхні, м*К/Вт. Дана величина розраховується за наступною формулою:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі димових газів до стінки реактору, Вт/(м²*К);

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки реактору до розплаву полімеру, Вт/(м²*К).

Тепловий потік реактору з оребренням Q_2 розраховується за формулою:

$$Q_2 = q_2 \cdot F_2 \cdot K$$

де q_2 – густина теплового потоку днища реактору з оребренням, Вт/м².

Оскільки матеріал та градієнт температур залишається незмінним, то дана величина буде дорівнювати густині теплового потоку реактору без оребрення:

$$q_2 = q_1$$

F_2 – площа днища реактору з оребренням, м², розраховується за формулою:

$$F_2 = F_1 + \sum F_n$$

де F_1 – площа днища реактору без оребрення, м²; $\sum F_n$ – сума площ ребер реактору, м²:

$$\sum F_n = F^1 + F^2 + F^3 + F^4$$

де F^1 , F^2 – площа першого та другого циліндрів оребрення, м²:

$$F^1 = F^2 = 2 \cdot \pi R \cdot h$$

де R – радіус днища реактору, м; h – висота ребра, м;

$$F^1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 0,05 = 0,0785 \text{ (м}^2\text{)}$$

$$F^2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 0,25 = 0,3925 \text{ (м}^2\text{)}$$

F^3 , F^4 – площа листів оребрення, м². Оскільки ребра прямокутного перерізу то їх площу розраховуємо за формулою площі прямокутника, але враховуємо, що ребра мають 2 площі:

$$F^3 = F^4 = 2 \cdot l \cdot h \cdot n$$

де l – довжина ребра, м; n – кількість ребер;

$$F^3 = 2 \cdot 0,138 \cdot 0,25 \cdot 8 = 0,552 \text{ (м}^2\text{)}$$

$$F^4 = 2 \cdot 0,071 \cdot 0,05 \cdot 4 = 0,0284 \text{ (м}^2\text{)}$$

$$\sum F_n = 0,0785 + 0,3925 + 0,552 + 0,0284 = 1,0514 \text{ (м}^2\text{)}$$

Отже, площа днища реактору з оребренням дорівнює:

$$F_2 = 1,7663 + 1,0514 = 2,817 \text{ (м}^2\text{)}$$

Коефіцієнт теплопередачі або коефіцієнт передачі K [Вт/м*К] залишається не змінним в обох випадках. Оскільки конструкційна форма реактору залишається незмінною.

Таким чином формула для розрахунку безрозмірного коефіцієнта теплової ефективності (η) приймає вигляд:

$$\eta = \frac{q_1 \cdot F_1 \cdot K}{q_2 \cdot F_2 \cdot K}$$

Після скорочення формула приймає наступний вигляд:

$$\eta = \frac{F_1}{F_2}, \quad \eta = \frac{1,7663}{2,817} = 0,62.$$

Для комп'ютерного моделювання теплових потоків, використовуючи конструкторську документацію та програмне забезпечення ANSYS, була створена робоча розрахункова сітка для реактора з газоходом (рис. 3). Сітка складається з 550 тис. тетраедричних елементів. Початкова температура продуктів згоряння становить 800 °С, а максимальна витрата – 12 м³/год. Ця модель дозволить оцінити термічні напружки та деформації в реакторі.

Для обчислення моделі задаємо початкові та граничні умови:

$$\text{Об'єм реактора складає: } V_p = 14 \text{ л} = 0,014 \text{ м}^3.$$



Рис. 4. Розрахункова сітка реактора з орбеним газоходом

Вага насипних відходів складає $\rho_{\text{в.}} = 570 \text{ кг/м}^3$ (що відповідає полімерним відходам у спресованому стані).

Звідси маса відходів, які завантажуються в реактор

$$m_{\text{в.}} = \rho_{\text{в.}} \cdot V_{\text{р.}} \cdot 570 \cdot 0,014 = 7,98 \text{ кг}$$

Питома енергія, необхідна для розкладу середнього складу відходів у реакторі, становить: $e_{\text{розкл.}} = 4,6057 \text{ МДж/кг}$

Енергія, необхідна для розкладання відходів масою

$$m_{\text{в.}} : E_{\text{розкл.}} = e_{\text{розкл.}} \cdot m_{\text{в.}} = 4,6057 \cdot 7,98 = 36,7535 \text{ МДж}$$

За максимальної теплової потужності головного пальника 25 кВт експериментально було встановлено, що час повного розкладу відходів у реакторі становить: $t_{\text{розкл.}} = 90 \text{ хв.} = 5400 \text{ с}$

Відповідно тепловий потік крізь стінку реактора складає:

$$Q_{\text{р.}} = \frac{E_{\text{розкл.}}}{t_{\text{розкл.}}} = \frac{36,7535 \cdot 10^6}{5400} = 6,8062 \text{ кВт}$$

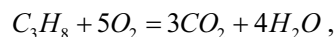
Згідно геометричних розмірів реактора площа поверхні теплообміну його складає $S_{\text{р.}} = \pi \cdot D_{\text{р.}} \cdot H_{\text{р.}} = 3,14 \cdot 0,194 \cdot 0,48 = 0,2926 \text{ м}^2$. Теплообмін через дно реактора не враховується, що дозволяє компенсувати нерівномірність теплообміну вздовж реактора, яка виникає через неоднорідний стан речовини всередині нього.

Таким чином, питома теплова напруженість поверхні теплообміну реактора становить:

$$q_{\text{р.}} = \frac{Q_{\text{р.}}}{S_{\text{р.}}} = \frac{6,8062}{0,2926} = 23,2611 \text{ кВт/м}^2$$

За такої теплової напруженості поверхні теплообміну час розкладу відходів у реакторі становитиме 30 хв.

Далі визначаємо витрати продуктів згоряння в газоході, якщо в якості палива для головного пальника використовується пропан (C_3H_8), що має формулу:



тоді:

$$V_{\text{н.з.}}^{\circ} = V_{\text{N}_2}^{\circ} + V_{\text{RO}_2}^{\circ} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ};$$

Витрати повітря необхідного для повного згоряння палива:

$$V^{\circ} = 0,0476 \cdot \left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot C_{\text{м}} H_{\text{н}} = 0,0476 \cdot \left(3 + \frac{8}{4}\right) \cdot 100 = 23,8 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Витрати азоту:

$$V_{\text{N}_2}^{\circ} = 0,79 \cdot V^{\circ} = 0,79 \cdot 23,8 = 18,8 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Витрати трьохатомних газів:

$$V_{\text{RO}_2}^{\circ} = 0,01 \cdot m \cdot C_{\text{м}} H_{\text{н}} = 0,01 \cdot 3 \cdot 100 = 3 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Витрати водяної пари:

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} &= 0,01 \cdot \left(\frac{n}{2} \cdot C_{\text{м}} H_{\text{н}} + 0,0161 \cdot V^{\circ}\right) = \\ &= 0,01 \cdot \left(\frac{8}{2} \cdot 100 + 0,0161 \cdot 23,8\right) = 4 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \end{aligned}$$

Тоді витрати продуктів згоряння в газоході:

$$V_{\text{н.з.}}^{\circ} = 18,8 + 3 + 4 = 25,8 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Для визначення усередненої щільності продуктів згоряння в газоході, приймаємо початкову та кінцеву температури продуктів згоряння палива:

$$t_{\text{н.}} = 900^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{к.}} \approx 300^{\circ}\text{C}$$

Знаходимо середню температуру згоряння за довжиною газоходу:

$$\bar{t}_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{н.}} + t_{\text{к.}}}{2} = \frac{900 + 300}{2} = 600^{\circ}\text{C}$$

Середня щільність продуктів деструкції за довжиною газоходу:

$$\bar{\rho}_{\text{н.з.}} = 1,26 \cdot \frac{273}{273 + \bar{t}_{\text{ср}}} = 1,26 \cdot \frac{273 + 600}{273} = 0,3940 \text{ кг/м}^3$$

Максимальна витрата горючого газу:

$$B_{\text{газ}} = 1,2 \text{ м}^3 / \text{год} = 0,3333 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}$$

Тоді масова витрата продуктів згоряння складає:

$$G_{\text{н.з.}} = V_{\text{н.з.}}^{\circ} \cdot B_{\text{газ}} \cdot \bar{\rho}_{\text{н.з.}} = 25,8 \cdot 0,3333 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3940 = 3,39 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$$

Значення граничних умов при моделюванні представлені в табл. 1.

На основі теоретичних розрахунків теплопереносу від гарячих газів до стінки реактора, що базуються на рівнянні збереження енергії, при комп'ютерному моделюванні використовувалась модель ламінарного потоку в газоході. Результати розрахунків включають швидкості та температуру газових потоків по всій довжині газоходу, ці дані наведені

в табл. 2 та представлені на зображеннях руху газів у газоході (рис. 4-7).

Таблиця 1

Значення граничних умов

Найменування	Показник
Вхід газоходу: Масові витрати, кг/с Температура, °C	$(0,6 \dots 3,4) \cdot 10^{-3}$ 900
Вихід газоходу: Тиск за газоходом, Па	-60
Стінка реактора: Тепловий потік, кВт	6,8

На рисунках 5-7 представлені дані про температуру газів, швидкості їх руху та втрати тиску в газоході. З рисунка 6 видно, що температура газів поступово знижується з віддаленням від пальника. Продукти згоряння, рухаючись зигзагоподібно, нагрівають корпус реактора до температури 450-600 °C. Рисунок 5 демонструє, що швидкість руху газів зростає до 0,86 м/с при зменшенні перерізу газоходу, не перевищуючи допустимі межі. Для оцінки інтенсивності обігріву реактора димовими газами також було проведено комп'ютерне моделювання руху продуктів згоряння в газоході з показниками втрати тиску.

З рисунка 6 видно, що втрати тиску зростають, але залишаються в межах допустимих норм, особливо в верхній частині газоходу, де підвищення щільності газу викликане звуженням газоходу.

Висновки. Розроблено експериментальну установку ЕУ БЦП – 14 для вивчення процесу циркуляційного піролізу. У статті детально описані основні конструктивні елементи стенду. Проведено теоретичні розрахунки та моделювання характеристик теплових потоків як всередині, так і навколо реактора. Результати розрахунків та комп'ютерного моделювання лінії потоку продуктів згоряння в газоході, включаючи показники температури, швидкості газів та витрат тиску, дозволяють:

- Оцінити теплові втрати системи.
- Визначити оптимальні режими роботи реактора.
- Вдосконалити конструкцію газоходу для підвищення ефективності процесу.

Отримані дані також сприяють розробці рекомендацій щодо покращення теплообміну та рівномірного розподілу температурних зон, що забезпечує більш стабільний та контрольований перебіг процесу циркуляційного піролізу.

Завдяки проведеним розрахункам та моделюванню стало можливим визначити вплив конструктивних змін на кінцеві параметри процесу, зокрема

Таблиця 2

Результати аналізу газового потоку з показниками температури, тиску та швидкості

Найменування	Показники					
$V_{\text{газ}}, \text{ м}^3/\text{час}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$G_{\text{п.з.}}, \text{ кг/с}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,27 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
$T_{\text{розкл.}}, \text{ мин}$	510	278	180	135	109	90
$Q_p, \text{ кВт/м}^2$	4,11	7,53	11,63	15,51	19,21	23,26
$P, \text{ Па}$	1,03	1,51	2,12	2,92	4,07	5,78



Рис. 5. Напрямки потоку продуктів згоряння в газоході з відображенням температури газів

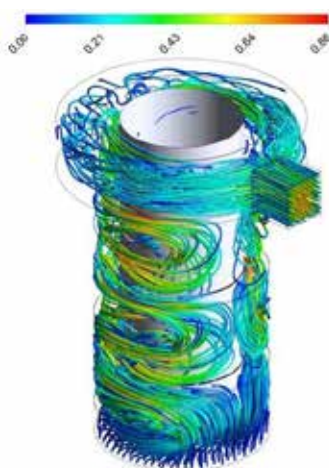


Рис. 6. Напрямки потоку продуктів згоряння в газоході з відображенням швидкості газів



Рис. 7. Напрямки потоку продуктів згоряння в газоході, а також показники втрати тиску

на зменшення втрат тепла та підвищення продуктивності реактора. Отримані результати також є основою для оптимізації подальших експериментальних досліджень, що спрямовані на вдосконалення роботи системи нагріву, зниження енергетичних витрат та покращення якісних характеристик отриманих продуктів піролізу.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує доцільність використання чисельного моделювання для прогнозування теплових режимів роботи реактора та оптимізації його конструкційних параметрів. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню ефективності процесу утилізації відходів та розвитку екологічно безпечних технологій переробки полімерних матеріалів.

Виходячи з наведеного розрахунку можна стверджувати, що оребрена поверхня реактора збільшує теплову ефективність експериментальної установки на 62%. Створена експериментальна установка надає можливість проведення експериментальних

випробувань для дослідження параметрів процесу БЦП, оптимізації робочих режимів обладнання та виявлення технологічних залежностей.

Перспективи використання результатів дослідження. Поряд з обчислювальними методами, лабораторне експериментування піролізу з циркуляцією може бути використане для допомоги в проектуванні та оптимізації робочих умов і надання даних, необхідних для валідації моделі. Однак під час тривалої роботи при високій температурі та багатьох повтореннях експерименти з піролізом часто є складними, дорогими та вимагають ретельного безпечного налаштування.

Це ще складніше під час проведення експериментів параметричного аналізу з різними робочими умовами. У результаті створення надійних обчислювальних моделей стає вирішальним для промислового проектування та впровадження циркуляційного піролізу.

Література

1. Маркіна Л. М., Рижков С.С., Рудюк М.В. Установка для непрерывной термической утилизации органических отходов с одержаньем жидкого топлива. Патент 50431 України на корисну модель, кл. F23G 5/027. заявл. 03.12.09; опубл. 10.06.2010. Бюл. № 11.
2. Маркіна Л. М., Рижков С.С., Рудюк М.В. Установка непрерывной термической утилизации полимерных отходов. Патент 93427 України на корисну модель, кл. F23G 5/027. заявл. 25.05.2009; опубл. 10.02.2011. Бюл. № 3.
1. Highly efficient conversion of plastic waste into fuel via thermal cracking: Thermo-structural analysis of the pyrolysis reactor and characterization of the final product. Jamal Oufkir, Rachid Cherouaki, Soufiane Zerraf, Said Belaaouad. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.02.027>.
2. Integrated method for planning waste management based on the material flow analysis and life cycle assessment. V Bendih, L Markina, N Matsai, I Kurychova, S Boichenko, S Priadko., Oleh Vlasenko Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 121 (10).
3. С. Р. Мельник, Ю. Р. Мельник, З. Г., Проектування та розрахунок технологічних процесів органічного синтезу. Навчальний посібник/Піх. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2005. 448 с.
4. Oufkir, J., Cherouaki, R., Zerraf, S., & Belaaouad, S. (2024). Highly efficient conversion of plastic waste into fuel via thermal cracking: Thermostructural analysis of the pyrolysis reactor and characterization of the final product. *Materials Today*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.02.027>
5. Garg, S., Nayyar, A., Buradi, A. et al. A novel investigation using thermal modeling and optimization of waste pyrolysis reactor using finite element analysis and response surface methodology. *Sci Rep* 13, 10931 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37793-8>
6. Czajczyńska Dina, Anguilano Lorna, Ghazal Heba, Krzyżyńska Renata, et al. (2017). Potential of Pyrolysis Processes in the Waste Management Sector. *Thermal Science and Engineering Progress*. 3. 10.1016/j.tsep.2017.06.003.
7. Yassir Makkawi, Yehya El Sayed, Mubarak Salih, Paul Nancarrow, et al. Fast pyrolysis of date palm (*Phoenix dactylifera*) waste in a bubbling fluidized bed reactor, *Renewable Energy*, Volume 143, 2019, Pages 719-730, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.028>.
8. Hosanna Uwitonze, Ayeon Kim, Heehyang Kim, Boris Brigljević, Hoang Vu Ly, Seung-Soo Kim, Mukesh Upadhyay, Hankwon Lim, CFD simulation of hydrodynamics and heat transfer characteristics in gas–solid circulating fluidized bed riser under fast pyrolysis flow condition, *Applied Thermal Engineering*, Volume 212, 2022, 118555, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118555>.
9. Ryzhkov, S., Rudyuk, N., & Markina, L. Research of Thermal Conductivity of the Condensed Mass of the Whole Waste Tires and Determination of Their Optimum Arrangement in the Pyrolysis Reactor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5), 12-19.
10. Critical factors and risks affecting municipal solid waste management strategies and waste-to-energy generation. L. Markina, S. Vambol, V. Vambol, A. Kowalczyk-Juško, O. Vlasenko, *Advances in Energy from Waste*, 371-402
11. Type of industries, waste options, and their potential. Vambol, L. Markina, V. Vambol, A. Mazur, P. Ziarati, P.A. Martin-Cervantes, *Advances in Energy from Waste*, 175-221.
12. RIA GHOSH, TUMPA HAZRA, INDRANIL MUKHERJEE, USHCATS, Svitlana, OLEH VLASENKO. Evaluating the environmental effects of open dumps and waste farming: A case study: Effects of Open Dumping. *Ecological Questions*. Online. 22 July 2024. Vol. 35, no. 4, pp. 1-27. Accessed 23 February 2025. DOI 10.12775/EQ.2024.046.
13. Оцінка факторів впливу видобутку вугілля на довкілля шляхом кореляційно-регресійного аналізу. Н.О. Д'яченко, О.В. Власенко, А.В. Ковальчук. 2023, Гірнича геологія та геоecологія, 47-66.