

УДК 628.47
Е 41

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ БАГАТОКОНТУРНОГО ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ПІРОЛІЗУ

С. С. Рижков, д-р техн. наук, проф.;
Л. М. Маркіна, канд. техн. наук, доц.;
М. В. Рудюк, старш. наук. співроб.;
М. І. Філатова, мол. наук. співроб.;
І. В. Литвинов, технік II категорії

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Розроблена експериментальна установка для дослідження технології багатоконтурного циркуляційного піролізу. Описані основні конструкційні елементи експериментальної установки ЕУ БЦП-14. Виконані комп'ютерне моделювання та теоретичні розрахунки характеристик теплових потоків навколо реактора.

Ключові слова: багатоконтурний циркуляційний піроліз, експериментальна установка, полімерні відходи, теплові потоки.

Аннотация. Разработана экспериментальная установка для исследования технологии многоконтурного циркуляционного пиролиза. Описаны основные конструкционные элементы экспериментальной установки ЭУ МЦП-14. Выполнены компьютерное моделирование и теоретические расчеты характеристик тепловых потоков вокруг реактора.

Ключевые слова: многоконтурный циркуляционный пиролиз, экспериментальная установка, полимерные отходы, тепловые потоки.

Abstract. An experimental plant for research of multicircuit circulating pyrolysis process was developed. Key design elements of the experimental plant ES MCP-14 were described. Computer simulations and theoretical calculations of the characteristics of heat flow around the reactor were carried out.

Keywords: multicircuit pyrolysis, experimental plant, polymer waste, heat flows.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Технологія багатоконтурного циркуляційного піролізу (БЦП), основана на принципі рециркуляції, дозволяє утилізувати всю суміш органічних високомолекулярних полімерних відходів з отриманим вихідним продуктом легких фракцій. Для проведення експериментальних досліджень з метою вивчення технологічних параметрів процесу БЦП, відпрацювання робочих режимів обладнання та виявлення технологічних залежностей необхідно розробити експериментальну установку.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для вивчення БЦП був створений ряд обладнання, що має конструктивні відмінності [1, 2]. У даній статті описується експериментальна установка ЕУ БЦП-14, для якої були враховані результати попередніх випробувань [3–5].

МЕТА СТАТТІ — моделювання параметрів БЦП для розробки експериментальної установки та відпрацювання робочих режимів обладнання, а також виявлення залежностей технологічних параметрів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для дослідження БЦП, вивчення технологічних параметрів процесу та виявлення їх залежностей

необхідне проведення експериментальних випробувань. Із цією метою була розроблена та створена експериментальна установка ЕУ БЦП-14.

Для визначення ефективності нагріву реактора за допомогою продуктів згоряння, що проходять через газохід, треба здійснити оцінку характеристик теплових потоків навколо реактора, які забезпечують його нагрів при згорянні пропану на головному пальнику та піролізного газу на допоміжному пальнику. Для комп'ютерного моделювання теплових потоків на основі конструкторської документації була розроблена робоча розрахункова сітка реактора з газоходом (рис. 1), яка складається з 550 тис. тетраєдроподібних елементів. Початкова температура продуктів згоряння взята 800 °С, а максимальна витрата складала 12 м³/год.

Для розрахунку моделі задано початкові та граничні умови.

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

Насипна вага відходів складає $\rho_b = 570 \text{ кг/м}^3$ (що відповідає спресованому стану полімерних відходів).

Тоді маса відходів, які завантажуються в реактор:

$$m_b = \rho_b V_p = 570 \cdot 0,014 = 7,98 \text{ кг.}$$

Питома енергія для розкладання усередненого складу відходів у реакторі

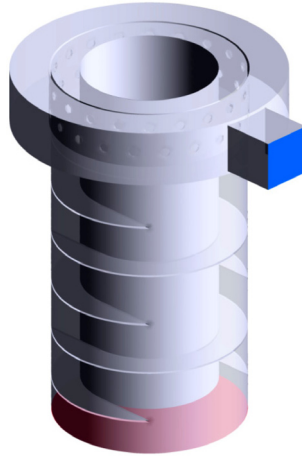


Рис. 1. Розрахункова сітка реактора з газоходом

$$e_{\text{розкл}} = 4,6057 \text{ МДж/кг.}$$

Енергія, необхідна для розкладання відходів масою m_v :

$$E_{\text{розкл}} = e_{\text{розкл}} m_v = 4,6057 \cdot 7,98 \text{ МДж.}$$

При максимальній тепловій потужності головного пальника 25 кВт експериментально було отримано час повного розкладання відходів у реакторі: $t_{\text{розкл}} = 90 \text{ хв} = 5400 \text{ с.}$

Відповідно тепловий потік крізь стінку реактора складає

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

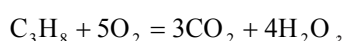
Згідно з геометричними розмірами реактора площа його поверхні теплообміну $S_p = \pi D_p H_p = 3,14 \cdot 0,194 \cdot 0,48 = 0,2926 \text{ м}^2$. Теплообмін крізь дно реактора не враховуємо, тим самим компенсуємо нерівномірність теплообміну за довжиною реактора, яка утворюється в результаті неоднорідного стану речовини всередині реактора.

Звідси питома тепла напруженість поверхні теплообміну реактора

$$q_p = \frac{Q_p}{S_p} = \frac{6,8062}{0,2926} = 23,2611 \text{ кВт/м}^2.$$

При даній тепловій напруженості поверхні теплообміну час розкладання відходів у реакторі складатиме 90 хв.

Визначаємо витрати продуктів згоряння в газоході, якщо як паливо, яке подається на головний пальник, використовується пропан (C_3H_8), що має формулу



тоді

$$V_{\text{п.з}}^o = V_{N_2}^o + V_{RO_2}^o + V_{H_2O}^o.$$

Витрати повітря, необхідного для повного згоряння палива:

$$V^o = 0,0476 \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n = \\ = 0,0476 \left(3 + \frac{8}{4} \right) \cdot 100 = 23,8 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Витрати азоту

$$V_{N_2}^o = 0,79 V^o = 0,79 \cdot 23,8 = 18,8 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Витрати трьохатомних газів

$$V_{RO_2}^o = 0,01 \cdot m \cdot C_m H_n = 0,01 \cdot 3 \cdot 100 = 3 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Витрати водяної пари

$$V_{H_2O}^o = 0,01 \left(\frac{n}{2} \cdot C_m H_n + 0,0161 V^o \right) = \\ = 0,01 \left(\frac{8}{2} \cdot 100 + 0,0161 \cdot 23,8 \right) = 4 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

тоді витрати продуктів згоряння в газоході

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

Для визначення середньої густини продуктів згоряння в газоході беремо початкову та кінцеву температури продуктів згоряння палива:

$$t_{\text{п}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}; t_{\text{к}} \approx 300 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Знаходимо середню температуру згоряння за довжиною газоходу:

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

Середня густина продуктів згоряння за довжиною газоходу

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

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

$$G_{п.з} = V_{п.з}^0 B_{газ} \bar{\rho}_{п.з} =$$

$$= 25,8 \cdot 0,3333 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3940 = 3,39 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с.}$$

Значення граничних умов при моделюванні наведені нижче:

Вхід газоходу: масові витрати температура	$(0,6 \dots 3,4) \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ 900 °C
Вихід газоходу: тиск за газоходом	-60 Па
Стінка реактора: тепловий потік	6,8 кВт

Виходячи з теоретичних розрахунків теплопереносу від гарячих газів до стінки реактора, в основі яких лежить рівняння збереження енергії, при комп'ютерному моделюванні застосовувалася модель ламінарного потоку в газоході. У результаті розрахунків були отримані швидкості та температура потоків газу по всій довжині газоходу, дані наведені в табл. 1.

На рис. 2–4 зображені температури газів, швидкості їх руху та втрати тиску в газоході. З рис. 2 видно, що температура газів поступово зменшується по мірі віддалення від пальника. Рухаючись зигзагоподібно, продукти згоряння здійснюють нагрів корпусу реактора до температури 450... 600 °C. На рис. 3 наведена швидкість руху

газів, що збільшується до 0,86 м/с зі зменшенням перерізу газоходу та не перевищує допустимих меж. Для оцінки інтенсивності обігріву реактора димовими газами також здійснене комп'ютерне моделювання руху продуктів згоряння в газоході з показниками втрати тиску. З рис. 4 видно, що втрати тиску збільшуються, але не перевищують допустиму норму, у верхній частині газоходу у зв'язку з підвищенням густини газу, яке виникає через звуження газоходу.

Для дослідження технології БЦП створена експериментальна установка ЕУ БЦП-14 (рис. 5 і 6).

Експериментальна установка включає в себе такі основні елементи: реактор піролізу з корзиною, в яку завантажуються відходи, багатоконтурної циркуляційної системи, що складається з трьох контурів, вихідний конденсатор та розподільну ємність, яка забезпечує розділення парогазової суміші (ПГС) на піролізний газ і рідку легку фракцію, а також пульт керування. Установка оснащена елементами безпеки у вигляді іскрогасника, що забезпечує безпечне спалювання піролізного газу на газовому пальнику, та запобіжного клапана, який забезпечує номінальний тиск у реакторі та скидання надлишку піролізного газу в збірний бак, при цьому система кранів забезпечує спалювання надлишку піролізного газу зі збірного бака на пальнику піролізного газу. Габаритні розміри установки складають 510×1285×1960 мм.

Таблиця 1. Дані аналізу руху газу з показниками температури, тиску та швидкості

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

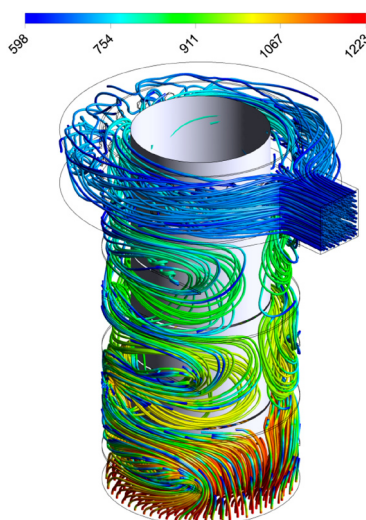


Рис. 2. Лінії руху продуктів згоряння в газоході з показниками температури газів

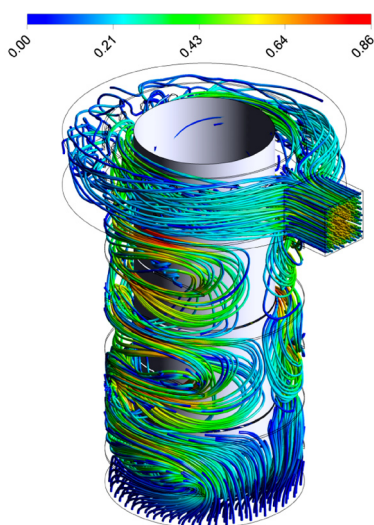


Рис. 3. Лінії руху продуктів згоряння в газоході з показниками швидкості газів

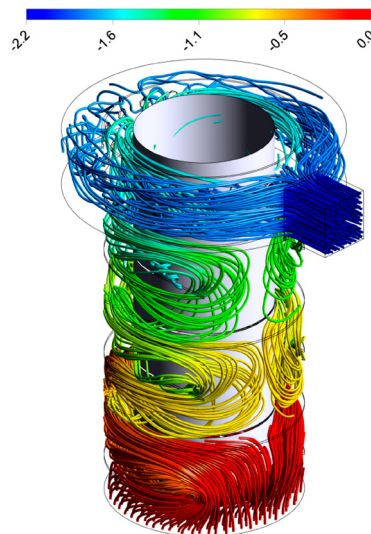


Рис. 4. Лінії руху продуктів згоряння в газоході з показниками втрати тиску

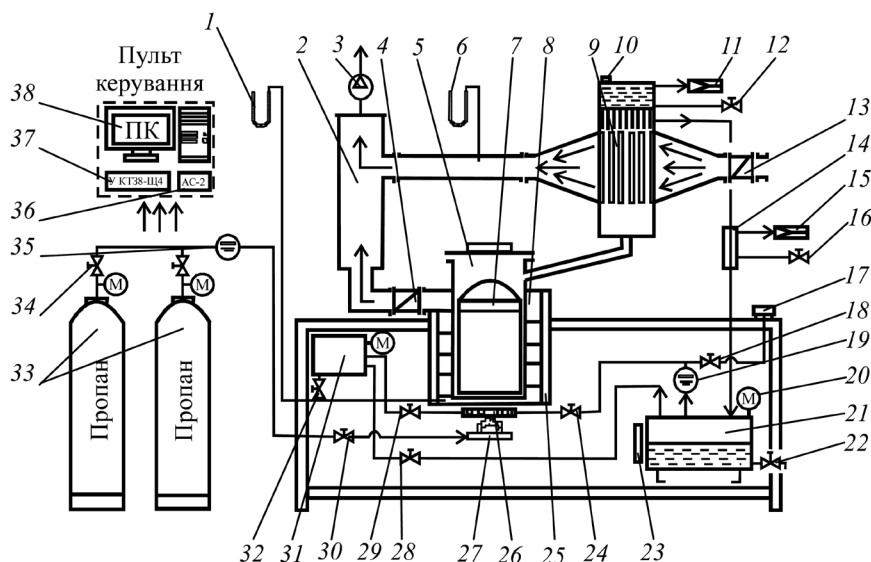


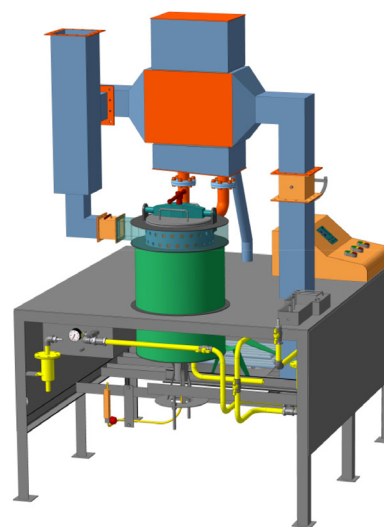
Рис. 5. Блок-схема експериментальної установки ЕУ БЦП-14: 1, 6 — U-подібні манометри; 2 — газохід реактора; 3 — втяжний вентилятор; 4 — дросельна заслінка регулювання тяги в газоході реактора; 5 — реактор; 7 — корзина з сировиною; 8 — оболонка обігріву реактора; 9 — система багатоконтурної циркуляції (багатоступінчастий теплообмінний апарат); 10 — пробка водяної камери; 11, 15 — витратоміри; 12 — кран регулювання потоку охолоджуючої води 3-го ступеня; 13 — шибер регулювання потоку охолоджуючого повітря 2-го ступеня; 14 — вихідний конденсатор; 16 — кран регулювання охолоджуючої води вихідного конденсатора; 17 — індикаторний пальник; 18 — кран індикаторного пальника; 19 — газовий лічильник; 20 — манометр накопичувального бака; 21 — накопичувальний бак; 22 — кран зливу продуктів піролізу; 23 — показник рівня в баці продуктів піролізу; 24, 29 — крани на пальник допалювання; 25 — ізоляція кожуха обігріву реактора; 26 — пальник допалювання; 27 — головний пальник; 28 — кран на ресивер; 30 — кран регулювання потоку газу на головному пальнику; 31 — ресивер; 32 — кран спуску конденсату з ресивера; 33 — балон з газом (пропан-бутан); 34 — кран підключення балона до паливної системи; 35 — газовий лічильник; 36 — декодер сигналу аналого-цифрового перетворювача (АЦП); 37 — АЦП УКТ38-ЩЦ; 38 — персональний комп'ютер з портом RS-232

Корпус реактора циліндричної форми, діаметром 194 мм і висотою 480 мм має два отвори діаметром 48 мм для патрубків виходу ПГС на перший контур БЦП. Реактор виготовлений зі сталі марки 12X18Н10Т. Сталь конструкційна криогенна аустенітного класу застосовується для деталей,

що працюють при температурі до 600 °С. У корпусі реактора розміщується корзина циліндричної форми, діаметром 184 мм і висотою 400 мм, в яку завантажуються відходи. Реактор герметично закривається кришкою, яка фіксується за допомогою гвинта, розташованого на траверсі. Нагрів реактора здійснюється



а)



б)

Рис. 6. Фото (а) та 3D-модель (б) установки ЕУ БЦП-14

за допомогою продуктів згоряння горючого газу пропану на головному пальнику, який розташований під реактором. Продукти згоряння проходять через газохід діаметром 280 мм, що розташований навколо реактора та, рухаючись зигзагоподібно, здійснюють нагрів корпусу реактора до температури 450...600°C. Для зниження витрат теплоти димових газів у навколишнє середовище та забезпечення безпечної температури поверхні установки 55°C використовуються насипний керамзит з гранулами товщиною 10 мм та мінеральна вата товщиною 50 мм, які розташовані навколо димоходу.

Конденсатор складається з трьох контурів. Парогазова суміш, утворена в реакторі, подається послідовно на кожен контур, які конструктивно зв'язані між собою. Перший контур являє собою камеру, яка охолоджується за рахунок природної конвекції повітря та є з'єднувальним елементом між реактором та другим контуром. Другий контур також виконаний у вигляді камери, що являє собою трубчастий пучок, усередині якого проходить ПГС, а із зовнішнього боку трубчастий пучок охолоджується повітрям, що подається вентилятором. Третій контур виконаний у вигляді робочої камери, яка знаходиться в тепловому контакті з водяною ємністю, а перегородка між ними з боку камери оснащена оребренням, яке

збільшує площу поверхні теплового контакту ПГС з охолоджувальною поверхнею перегородки.

Вихідний конденсатор являє собою циліндричну камеру, оснащену водяною оболонкою, яка забезпечує охолодження ПГС до температури 25...35°C.

Розподільна ємність виконана у вигляді герметичного бака з нижнім краном для видалення рідкої фракції і верхнім патрубком для подачі піролізного газу на пальник.

Таким чином, створена експериментальна установка дозволяє проведення експериментальних випробувань для вивчення параметрів процесу БЦП, відпрацювання робочих режимів обладнання та виявлення залежностей технологічних параметрів.

ВИСНОВКИ

Розроблена експериментальна установка ЕУ БЦП-14 для дослідження процесу багатоконтурного циркуляційного піролізу. Описані основні конструкторські елементи установки. Проведений теоретичний розрахунок характеристик теплових потоків навколо реактора. Результати розрахунків і комп'ютерне моделювання лінії руху продуктів згоряння в газоході з показниками температури, швидкості газів та витрати тиску детально зображені на рисунках та підтверджують ефективність обігріву реактора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Пат. 93427 України, кл. F23G 5/027. Установка безперервної термічної утилізації полімерних відходів [Текст] / Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М. В., Гершов Ю. І. — № 93427 ; заявл. 25.05.2009 ; опубл. 10.02.11, Бюл. № 3.
- [2] Пат. 50431 України на корисну модель, кл. F23G 5/027. Установка для безперервної термічної утилізації органічних відходів з одержанням рідкого палива [Текст] / Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М. В. — № 50431 ; заявл. 03.12.09 ; опубл. 10.06.10, Бюл. № 11.

- [3] **Рижков, С.С.** Аналіз процесу регулювання потоків у циркуляційній системі багатоконтурного циркуляційного піролізу [Текст] / С.С. Рижков, Л.М. Маркіна // Електронне видання «Вісник Національного університету кораблебудування». — Миколаїв : Видавництво НУК, 2010. — № 1. — С. 144–151.
- [4] **Рижков, С.С.** Дослідження раціональних технологічних параметрів роботи установки ЕУ БЦП-14 [Електронний ресурс] / С.С. Рижков, Л.М. Маркіна, М.В. Рудюк, М.І. Філатова // Електронне видання «Вісник Національного університету кораблебудування». — Миколаїв : Видавництво НУК, 2011. — № 4. — Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [5] **Рижков, С.С.** Інноваційні технології утилізації органічних відходів з отриманням альтернативного палива на основі багатоконтурного циркуляційного піролізу [Текст] / С.С. Рижков, Л.М. Маркіна, М.В. Рудюк // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв : Видавництво НУК, 2010. — № 2 (431). — С. 133–142.

© Колектив авторів

Надійшла до редколегії 05.01.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *А. П. Шевцов*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 1, 2012