

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТОКІВ У ЦИРКУЛЯЦІЙНІЙ СИСТЕМІ БАГАТОКОНТУРНОГО ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ПІРОЛІЗУ

С. С. Рижков, проф., д-р техн. наук;
Л. М. Маркіна, доц., канд. техн. наук

Національний університет кораблебудування, м. Николаїв

Анотація. Виявлені основи глибокої переробки органічних відходів методом багатоконтурного циркуляційного піролізу та можливості регулювання глибини деструкції на проміжних етапах переробки з одержанням альтернативного рідкого палива. Визначені технологічні температурні показники контурів багатоконтурної циркуляційної системи.

Ключові слова: високомолекулярні органічні відходи, багатоконтурний піроліз, циркуляція, альтернативне рідке паливо.

Аннотация. Выявлены основы глубокой переработки органических отходов методом многоконтурного циркуляционного пиролиза и возможности регулирования глубины деструкции на промежуточных этапах переработки с получением альтернативного жидкого топлива. Определены технологические температурные показатели контуров многоконтурной циркуляционной системы.

Ключевые слова: высокомолекулярные органические отходы, многоконтурный пиролиз, циркуляция, альтернативное жидкое топливо.

Abstract. Bases of the deep processing of organic wastes are exposed by the method of circulation pyrolysis and possibilities of adjusting of depth of destruction on the intermediate stages of processing with the receipt of alternative oil-fuel, the technological temperature indexes of contours of the circulation system are certain.

Keywords: high molecular organic waste materials, multiloop pyrolysis: circulation, alternative liquid fuel.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У різних країнах докладаються значні зусилля щодо розробки оригінальних схем утилізації побутових і промислових відходів з одержанням максимальної кількості альтернативного рідкого палива. Недоліком застосування пропонувананих схем є те, що склад відходів, які направляються на утилізацію, змінюється в широких межах і спрогнозувати його практично неможливо — у результаті не можна оперативно змінювати параметри процесу, щоб отримувати якісний продукт. Дана ситуація посилюється ще

й тим, що фізичні й хімічні характеристики відходів істотно відрізняються одна від одної, а це вимагає нового підходу до визначення технологічної схеми деструкції відходів.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ — аналіз потоків парогазової суміші (ПГС) у рециркуляційній системі багатоконтурного циркуляційного піролізу (БЦП) для можливості впливу на технологічні параметри процесу деструкції відходів шляхом зміни ступеня деструкції первісної сировини з метою одержання стійких до впливу зовнішніх факторів складових рідких продуктів з мінімальною молекулярною масою.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Дослідження методу одержання якісного альтернативного рідкого палива шляхом багатоконтурного циркуляційного піролізу зводяться до вирішення наступних завдань: забезпечення повної циркуляції важких рідких фракцій з повним використанням реакційного об'єму; досягнення такого ступеня деструкції сировини, при якому вихід цільового продукту максимальний.

Сутність технології багатоконтурного піролізу органічних відходів полягає в збільшенні ступеня деструкції за рахунок селективної конденсації на кожному контурі більш важких вуглеводнів парогазової суміші та їх більш глибокій багатоциклічній деструкції за замкнутим циклом у паралельному ланцюзі з'єднаних контурів [1, 2, 4].

Розподіл складових продуктів розкладу суміші органічних відходів за технологією БЦП можна простежити за схемою, представленою на рис. 1. При цьому загальна формула матеріального потоку матиме вигляд $\Sigma V_{\text{зар}} = V_{\text{р}} + V_{\text{г}} + V_{\text{г}}$.

Це рівняння впливає з основного положення, що кількість вихідних рідких ($V_{\text{р}}$),

газоподібних ($V_{\text{г}}$) і твердих ($V_{\text{т}}$) продуктів дорівнює кількості вхідних у реактор органічних відходів (закон збереження маси речовини).

На схемі прийняті позначення: ΣV — сумарна маса всіх складових вихідних органічних відходів; $V_{\text{ПГС}}$ — масова характеристика парогазової суміші, яку складають леткі речовини, утворені при термічному розкладанні органічних відходів; $V_{\text{л.п}}$ — масова частка легкої рідкої фракції, виділеної на вихідному контурі з ПГС при первинному піролізі із заданими характеристиками; $V_{\text{г.п}}$ — масова частка піролізного газу, виділеного на вихідному контурі з парогазової суміші при первинному піролізі; $\Sigma V_{\text{т.п}}$ — сумарна масова характеристика важкої рідкої фракції, виділеної з ПГС при первинному піролізі та розподіленої за трьома контурами циркуляційної системи; $V_{\text{л.к}}$ — масова частка легкої рідкої фракції, виділеної на вихідному контурі, отриманої при вторинному піролізі важких рідких фракцій, виділених на контурах циркуляційної системи; $\Sigma V_{\text{т.к}}$ — сумарна масова характеристика залишкової важкої рідкої фракції, що циркулює в триконтурній системі до одержання легких рід-

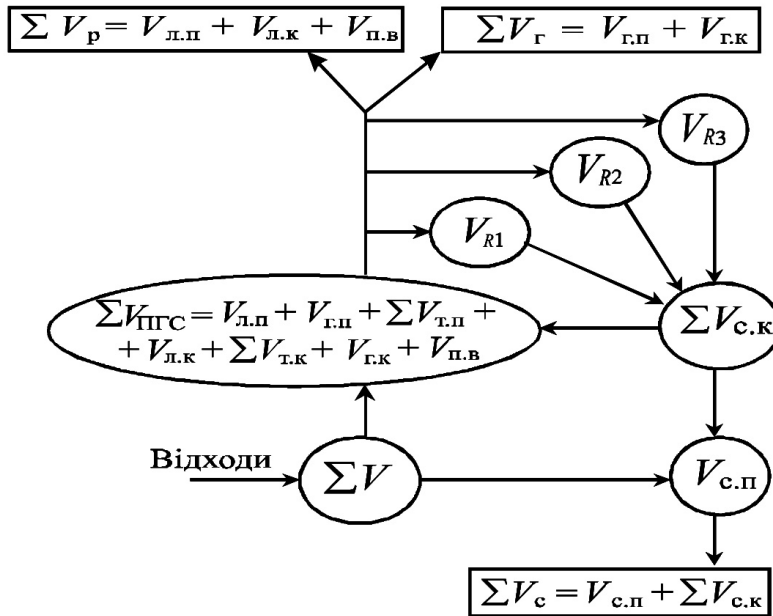


Рис. 1. Схема розподілу складових продуктів термічного розкладу органічних відходів за технологією БЦП

ких фракцій із заданими характеристиками; $V_{\text{гк}}$ — масова частка піролізного газу, виділеного на вихідному контурі та отриманого при глибокому розкладанні важких рідких фракцій на триконтурній циркуляційній системі; $V_{\text{п.в}}$ — масова частка піролізної води, виділеної на вихідному контурі та отриманої при глибокому розкладанні органічних відходів; $\Sigma V_{\text{с}}$ — масова частка твердого залишку і пірокарбону, вилученого з реактора після закінчення циклу БЦП; $V_{\text{с.п}}$ — масова частка пірокарбону після первинного піролізу; $\Sigma V_{\text{с.к}}$ — сумарна масова характеристика пірокарбону, що утвориться після вторинного піролізу важких рідких фракцій; $V_{R_1}, V_{R_2}, V_{R_3}$ — масові частки важкої рідкої фракції, що надходить відповідно на перший, другий і третій контури; $\Sigma V_{\text{р}}$ — сумарна масова характеристика рідкої фракції, що надходить на вихідний контур; $\Sigma V_{\text{г}}$ — сумарна масова характеристика піролізного газу, що надходить на вихідний контур.

Переважає одержання того або іншого вихідного продукту визначається можливостями його використання і може бути досягнуто шляхом відповідного апаратурного оформлення та регулювання технологічних параметрів робочого режиму. А саме, ступеня деструкції початкової і проміжної сировини, який регулюється температурними показниками кожного контуру, тобто температурою конденсування ПГС, та утворення важких рідких фракцій, які в подальшому прямують на додаткову деструкцію, тобто $V_{R_1}, V_{R_2}, V_{R_3}$.

Важливим параметром, за яким можна поєднувати початкову сировину та показники вихідного продукту, контролювати показники, а також оцінювати якість проміжної фракції, є молекулярна маса [3]. Зі зниженням молекулярної маси в процесі збільшення глибини розкладання того або іншого полімеру змінюється його агрегатний стан, знижується в'язкість полімерної рідини, а також її температура кипіння, відповідно знижується температура конденсації парів важких рідких фракцій. Збільшення глибини деструкції того самого полімеру спричиняє зміна не тільки його молекулярної маси, але й хімічного складу, що істотно змінює

властивості полімеру (хімічну і термічну стійкість та ін.).

Результати експериментальних досліджень показали, що незалежно від суміші подаваних відходів можна змінювати значення молекулярної маси вихідної рідкої фракції. Якщо її молекулярна маса $M > 150$, температуру охолоджувача кожного контуру, починаючи з першого, необхідно зменшити від розрахункової на 25...50 °С при заданій кількості контурів. У цьому випадку кількість важкої рідкої фракції, що відбирається на кожному контурі, збільшиться і відповідно буде збільшуватися ступінь розкладання продуктів піролізу. Якщо на виході рідка фракція буде мати $M < 150$, температуру охолоджувача кожного контуру, починаючи з останнього, необхідно збільшити від розрахункової на 25...50 °С. У такому випадку кількість важкої рідкої фракції, що відбирається на кожному контурі, зменшується й відповідно ступінь розкладання продуктів піролізу буде зменшуватися. Якщо й після цього співвідношення $M < 150$ не змінюється, то необхідно зменшити кількість контурів шляхом вирівнювання температур сусідніх контурів, починаючи з температури першого контуру.

Наприклад, температура першого контуру $350 + 50 = 400$ °С, і якщо температуру другого контуру також підняти до 400 °С, то зазначені два контури будуть являти собою один контур. У даному випадку кількість важкої рідкої фракції, що відбирається на першому і другому контурах у сумі буде дорівнювати кількості рідини, яка відбирається на першому контурі, й відповідно ступінь розкладання продуктів піролізу ще більше зменшиться, крім «перепалів». Таким чином, це дозволяє забезпечити можливість керування ступенем термічного розкладання вихідних органічних відходів.

Сутність методу керування глибиною переробки високомолекулярних органічних відходів пояснюється схемою, показаною на рис. 2, що включає в себе систему циркуляції та охолодження важких рідких фракцій.

Установка для реалізації БЦП з урахуванням регулювання глибини деструкції високомолекулярних органічних відходів містить реактор 1 з бункером 2 для заванта-

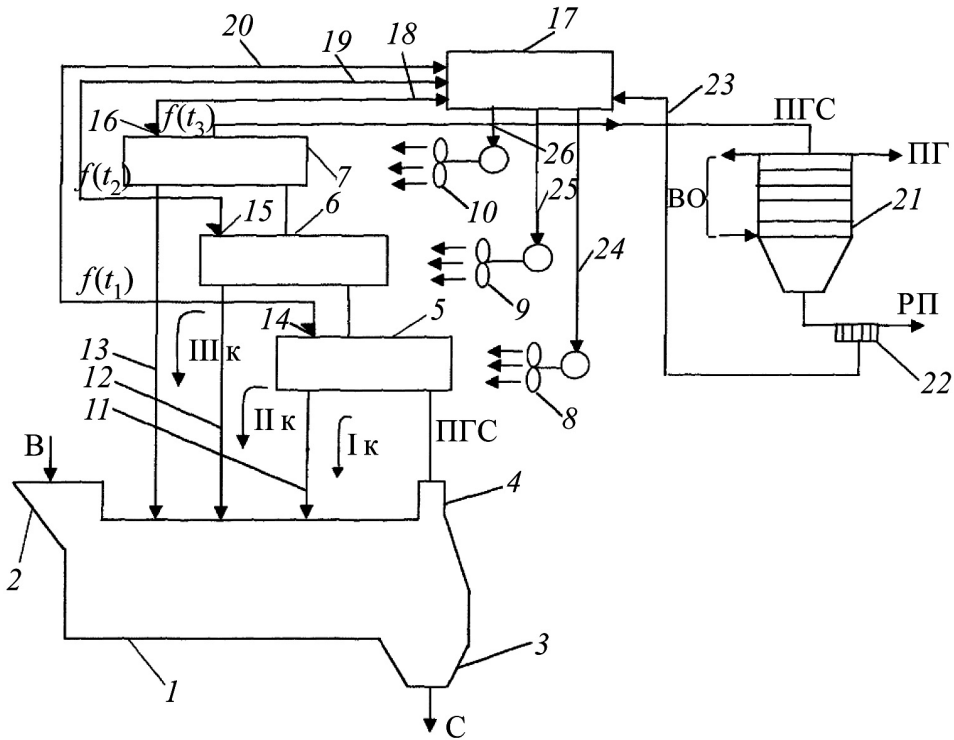


Рис. 2. Схема установки із системою керування глибиною переробки відходів на основі методу БЦП: В — відходи; С — пірокарбон; ПГС — парогазова суміш; I к, II к, III к — триконтурна циркуляційна система; ВО — водяна система охолодження; ПГ — піролізний газ; РП — вихідна рідка фракція — паливо; $f(M)$ — функція зміни молекулярної маси; $f(t_1), f(t_2), f(t_3)$ — функції зміни температури охолоджувачів по контурах

ження відходів і бункером 3 для вивантаження пірокарбону. Патрубок 4 призначений для відводу ПГС з реактора 1 у багатоконтурну циркуляційну систему, що містить, наприклад, три контури I к, II к, III к. Кожний контур оснащений охолоджувачем відповідно 5, 6 і 7 з повітряним охолодженням, виконаним у вигляді вентилятора відповідно 8, 9, 10 з індивідуальним електроприводом, що створює спрямований потік холодного повітря на охолоджувач, і трубопроводами 11, 12, 13 для повернення важкої рідкої фракції в реактор 1. Охолоджувач кожного контуру оснащений датчиком температури 14, 15, 16, при цьому параметр функції зміни температури $f(t)$ від кожного контуру передається на блок керування 17 по з'єднаннях 18, 19, 20. Останній охолоджувач з'єднаний з вихідним конденсатором 21 з водяним охолодженням.

Датчик 22 подає сигнал, який відповідає зміні функції в'язкості та пропорційний па-

раметру функції зміни молекулярної маси вихідного рідкого палива $f(M)$, що і передається на блок керування 17 по зв'язку 23, а електроприводи повітряного охолодження 8, 9, 10 управляються з блока керування 17 по зв'язках 24, 25, 26.

Робота датчика 22 побудована на принципі пропорційної залежності в'язкості рідини від молекулярної маси $|\eta| \equiv M$ при заданій температурі.

Таким чином, при одержанні вихідної рідкої фракції з молекулярною масою $M > 150$ датчик 22 подає сигнал $f(M)$ на блок керування 17, що збільшує напругу на приводі вентилятора 8. Збільшуючи при цьому його оберти, у результаті інтенсивність обдуву охолоджувача 5 збільшують і температуру його знижують від розрахункової 350 до 300 °С. У цьому випадку кількість важкої рідкої фракції, що відбирається на першому контурі, збільшиться й відповідно збіль-

шиться ступінь розкладу продуктів піролізу. Якщо співвідношення $M > 150$ не змінюється, тоді блок керування збільшує напругу на приводі вентилятора 9, знижуючи тим самим температуру охолоджувача 6 із 250 до 200 °С. При цьому кількість важкої рідкої фракції, що відбирається на другому контурі, також збільшується, відповідно збільшується ступінь розкладу продуктів піролізу. Якщо ж це не змінює співвідношення $M > 150$, то аналогічним чином знижують температуру на охолоджувачі 7 із 150 до 100 °С.

У даному випадку кількість важкої рідкої фракції, що відбирається, зростає і на третьому контурі й відповідно ще більше збільшиться ступінь розкладу продуктів піролізу.

Кожен охолоджувач 5, 6, 7 оснащений температурним датчиком 14, 15, 16, що вимірює температуру охолоджувача, який подає сигнал $f(t_1)$, $f(t_2)$, $f(t_3)$ по зв'язках 18, 19, 20 на блок керування 17, що є зворотним зв'язком по температурі для коректування швидкості обертання відповідного вентилятора системи повітряного, забезпечуючи зниження температури охолоджувачів максимум на 50 °С.

Цього достатньо для зміни співвідношення $M > 150$ при максимальних величинах молекулярних мас відходів, що підтверджено в процесі досліджень.

У випадку одержання рідкої фракції з $M < 150$ датчик 22 подає відповідний сигнал $f(M)$ на блок керування 17, який знижує напругу на приводі вентилятора, починаючи з десятого, знижуючи при цьому його оберти. У результаті інтенсивність обдуву охолоджувача 7 знижують і температуру його збільшують із 150 до 200 °С.

У такому випадку кількість важкої рідкої фракції, що відбирається на третьому контурі, зменшується, відповідно ступінь розкладу продуктів піролізу буде знижуватися. Якщо співвідношення $M < 150$ не змінюється,

тоді блок керування 17 послідовно збільшує температуру на охолоджувачі 6 з 250 до 300 °С і на охолоджувачі 5 із 350 до 400 °С, аналогічним чином знижуючи відповідно ступінь розкладу продуктів піролізу. А якщо й ці дії не змінюють співвідношення $M < 150$, то зменшують кількість контурів шляхом вирівнювання температур сусідніх контурів, починаючи з температури першого контуру. У цьому разі знижують оберти вентилятора 9 до поступового збільшення температури другого контуру до 400 °С, як і першого, у цьому випадку перший і другий контури будуть представлятися як один контур. Кількість важкої рідкої фракції, що відбирається на обох контурах, у сумі дорівнюватиме кількості рідини, що відбирається на першому контурі, й т. д. Відповідно ступінь розкладу продуктів піролізу ще більше зменшиться.

При проведенні первинного піролізу, одно- і двоконтурного піролізу була визначена легка частина ПГС, що надходить на I, II і III контури (табл. 1, 2). Дані з досліджень зазначені для суміші відходів, яка складається з 10% паперу та текстилю, 10% нафтошламів і 15% поліетилентерефталату, 15% поліетилену, 15% поліпропілену, 10% полістиролу, 25% гуми, максимальна температура нагрівання відходів — 600 °С, загальний час процесу — 5 год, температури I, II і III контурів — 350, 250 і 150 °С відповідно.

Як видно з табличних даних, кількість ПГС, що утвориться, збільшується від контуру до контуру за рахунок більш глибокої деструкції і зменшення кількості твердого залишку, тому при перерахунку на первинний рециркулянт значень реагенту, що переходить на більш високий рівень, $V_n > 1$.

Загальна кількість ПГС визначається після проведення БЦП підсумовуванням кількості отриманого пірогазу і рідкої фракції: $\Sigma V_{\text{ПГС}} = V_r + V_p$, де V_p = маса/густина.

Таблиця 1. Кількість легких фракцій, що переходять на наступний контур, % (мас.)

$V_{\text{ПГС}}$	$V_{\text{л.п}}$		$V_{\text{л.к}}$	
Первинний рециркулянт	У перерахуванні на сировину	У перерахуванні на первинний рециркулянт	У перерахуванні на сировину	У перерахуванні на первинний рециркулянт
0,48	0,57	1,06	0,62	1,15

Таблиця 2. Баланс потоків у процесі БЦП досліджуваної суміші, % (мас.)

Проміжні продукти					
V	V_{R1}	V_{R2}	V_{R3}	V_1	V_2
0,48	0,31	0,16	0,08	0,57	0,62
Кінцеві продукти					
Піроліз			Газ	Рідина	Тверда речовина
Первинний			0,13	0,35	0,52
Одноконтурний			0,11		0,41
Двоконтурний			0,14	0,48	0,38
Триконтурний			0,17	0,46	0,37

З табл. 2 видно, що при проведенні більш глибокого піролізу з рециркуляцією важких фракцій збільшується кількість газу на 4 %, зменшується кількість твердого залишку на 15 %. Кількість рідкої фракції збільшується за рахунок випарювання летких речовин з пірокарбону, однак на третьому контурі відбувається невелике її зменшення за рахунок більш глибокого розкладання на газоподібні продукти, у підсумку загальне збільшення рідкої фракції 11 %.

Для інших модельних сумішей значення таких збільшень коливаються в межах для газу від 3 до 12 %, для рідкої фракції — від 8 до 25 %, при цьому зменшується утворення твердого залишку до 20 % залежно від параметрів первинного піролізу.

Збільшення ступеня деструкції здійснюється за рахунок регулювання температурних показників контурів у залежності від значення молекулярної маси (рис. 3):

a — на першому контурі; *b* — на другому; *в* — на третьому.

Подані криві позначають різний склад початкових сумішей, які утилізувалися: крива 1 — 50 % поліетилену, 25 % поліпропіле-

ну, 20 % полістиролу; крива 2 — 100 % гуми; крива 3 — 10 % паперу та текстилю, 10 % нафтошламів і 15 % поліетилентерефталату, 15 % поліетилену, 15 % поліпропілену, 10 % полістиролу, 25 % гуми.

Як видно з рис. 3, *a*, різке зниження молекулярної маси відбувається практично одночасно, незалежно від складу суміші, яка надходить на БЦП. Зменшення значення молекулярної маси змінюється значно до температури контуру 330...360 °С, після цієї температури зміни проходять незначно. Для досягнення мінімальних втрат, виходячи з теоретичних розрахунків по максимальному виходу цільового продукту та мініимальному реакційному об'єму, температуру першого контуру необхідно прийняти такою, що дорівнює 350 °С. Аналогічні дослідження були проведені для різних сумішей.

При аналізі даних рис. 3, *b* видно, що також відбувається зниження молекулярної маси і на другому контурі при зниженні його температури приблизно до 250 °С, що супроводжується різким стрибком утворення кількості важкої рідкої фракції, циркулюючої на контурі. З урахуванням теоретичних

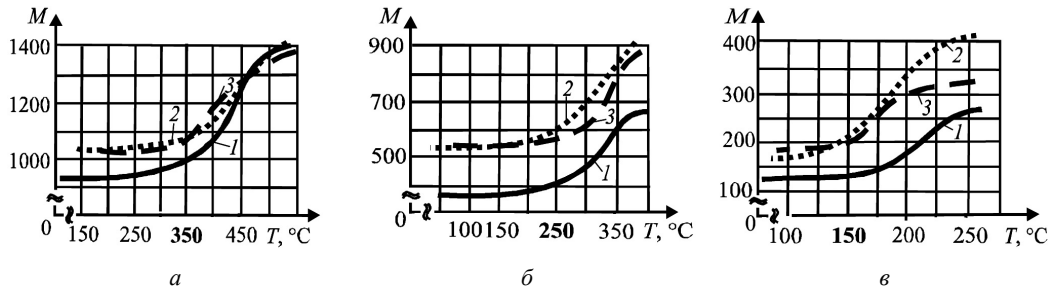


Рис. 3. Залежність зниження молекулярної маси парогазової суміші від зниження температури контурів БЦС

розрахунків температуру другого контуру можна прийняти 250 °С.

При виборі температури третього контуру (див. рис. 3, в) задаються такі ж умови ведення процесу піролізу: температури першого та другого контурів дорівнюють 350 і 250 °С відповідно. З урахуванням зниження значення молекулярної маси сконденсованої рідкої фракції температура третього контуру приймається в межах 150 °С.

Обмеженість кількості важкої рідкої фракції, що надходить на четвертий контур (менше 7 % від загального завантаження реактора), і в умовах зниження температури наступного контуру всього на 50...60 °С застосування чотириконтурної циркуляційної системи з економічної точки зору нерентабельно.

На основі викладених вище досліджень можна зробити висновок, що при деструкції різних модельних сумішей є збіги в температурних характеристиках контурів. Отже, незалежно від вихідного складу відходів, що утилізуються, температури контурів становлять 340...370 °С для першого контуру, 220...250 °С для другого й 120...160 °С для третього контуру.

Виходячи з розглянутого вище, кількість контурів рециркуляції може визначатися за експериментальною залежністю

$$N = \frac{t_{\text{ПГС}} - t_c}{100 \dots 150 \text{ } ^\circ\text{C}},$$

де N — кількість ступенів охолодження (кількість контурів); $t_{\text{ПГС}}$ — початкова температура первинної парогазової суміші, °С; t_c — температура кінцевого ступеня охолодження, °С.

ВИСНОВКИ

Застосування принципу рециркуляції важких рідких фракцій у процесі БЦП органічних відходів є ефективним технологічним прийомом, який дозволяє інтенсифікувати процес глибокого термічного перетворення суміші відходів, що істотно відрізняються один від одного як за хімічними, так і фізичними характеристиками, а також, впливаючи на температурні показники контурів рециркуляційної системи, змінювати ступінь деструкції реагенту, змінюючи при цьому якісні та кількісні показники вихідного альтернативного палива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Маркіна Л.М. Модельні дослідження переробки органічних відходів методом багатоконтурного піролізу з отриманням альтернативного палива // Зб. наук. пр. НУК. — 2008. — № 4 (421). — С. 101–109.
- [2] Маркіна Л.Н. Моделирование и расчет элементов технологии многоконтурного циркуляционного пиролиза высокомолекулярных органических отходов // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2006. — № 4. — С. 71–76.
- [3] Особенности процесса многоконтурного пиролиза высокомолекулярных органических отходов / С.С. Рыжков, Л.Н. Маркина, В.П. Бабий, Н.В. Рудюк // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2001. — № 5. — С. 56–61.
- [4] Рыжков С.С., Маркіна Л.М. Експериментальні дослідження утилізації органічних відходів методом багатоконтурного циркуляційного піролізу // Зб. наук. праць НУК. — 2007. — № 5 (416). — С. 100–106.