

DOI 10.15589/jnn20150415
УДК 658.567
А64

ANALYSIS OF THE MAIN THERMODYNAMIC PARAMETERS
OF MULTISTAGE CIRCULATION PYROLYSIS OF ORGANIC WASTE

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
БАГАТОКОНТУРНОГО ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ПІРОЛІЗУ
ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

Serhii S. Ryzhkov
rektor@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-9560-2765

Liudmyla M. Markina
markserg@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3632-1685

Marharyta S. Kryva
marharyta.kryva@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-9492-3268

Viktoria V. Hlyniana
XXXXXXX@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0000-0000-0000

С. С. Рижков
д-р техн. наук, проф.

Л. М. Маркіна
канд. техн. наук, доц.

М. С. Крива
асп.

В. В. Глиняна
магістрант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The process of destruction recycling of organic waste using the technology of multistage circulation pyrolysis (MCP) as a thermodynamic system has been studied in the article. Thermodynamic analysis of the main characteristics thermal of the MCP reactor when utilizing different types of organic waste is conducted. The composition of the products of their destruction is determined. Using the obtained data, conclusions on the expediency of the process, the possibility of complete recycling under the conditions of achieving the desired concentration of output products are made. The optimum temperature range is determined for the utilization process which includes the intensification of destructive waste transformations. The exergetic efficiency of the technology is estimated on the basis of calculation of exergetic performance coefficient of the reactor to determine the thermal energy consumption in the process of organic waste destruction. Having analyzed the obtained data, it is established that the rise of the working temperature of the MCP reactor to 600 °C causes the increase of the efficiency of the organic waste recycling plant and growth of the maximum effective work obtained from the heat fed to the reactor. With the increment of performance capability of the thermodynamic MCP system, the depth of destruction of complex hydrocarbon waste increases accordingly.

Keywords: multistage circulating pyrolysis (MCP); thermal destruction; organic waste; thermodynamic parameters; exergetic efficiency; exergy; maximum effective work; performance coefficient.

Анотація. В роботі досліджено процес деструкційної переробки органічних відходів за технологією багатоконтурного циркуляційного піролізу (БЦП) як термодинамічної системи. Проведено термодинамічний аналіз процесу утилізації для різних видів органічних відходів та визначено основні термодинамічні показники БЦП. Визначено оптимальний температурний інтервал проведення процесу утилізації, в межах якого здійснюється інтенсифікація деструктивних перетворень відходів. Проведено оцінку ексергетичної ефективності технології БЦП та розраховано коефіцієнт корисної дії устаткування.

Ключові слова: багатоконтурний циркуляційний піроліз (БЦП); термічна деструкція; органічні відходи; термодинамічні показники; ексергетична ефективність; ексергія; максимально корисна робота; коефіцієнт корисної дії.

Аннотация. В работе исследован процесс разрушительной переработки органических отходов по технологии многоконтурного циркуляционного пиролиза (БЦП) как термодинамической системы. Проведен термодинамический анализ процесса утилизации для различных видов органических отходов и определены основные термодинамические показатели БЦП. Определен оптимальный температурный интервал проведения процесса утилизации, в рамках которого осуществляется интенсификация деструктивных преобразований отходов.

Проведена оцінка ексергетическої ефективності технології БЦП і розраховано коефіцієнт корисної дії обладнання.

Ключевые слова: многоконтурный циркуляционный пиролиз (БЦП); термическая деструкция; органические отходы; термодинамические характеристики; эксергетическая эффективность; эксергии; максимально полезная работа; коэффициент полезного действия.

REFERENCES

- [1] Balan R. K., Tatybekov A. A., Engelsht V. S. *Termodinamicheskiy analiz gazifikatsii i szhiganiya tverdykh bytovykh otkhodov v atmosfere kisloroda* [Thermodynamic analysis of gasification and incineration of municipal solid waste in oxygen atmosphere]. *Izvestiya NAN KR, Bishkek* [Proceedings of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic], 2007, no. 4, pp. 68–75.
- [2] Belkov V. P., Shestopalov V. V., Kafarov V. V. *Matematicheskie modeli khimiko-tekhnologicheskikh protsessov Chast 2* [Mathematical models of chemical technology processes. Part 2]. Moscow, Mosk. Khim.-tekhno. Intim. D. I. Mendeleeva Publ., 1981. 40 p.
- [3] Zaytseva T. A. *Poligon deponirovaniya tverdykh bytovykh otkhodov (TBO) kak antropogennaya ekologicheskaya sistema* [Landfill depositing of municipal solid waste (MSW) as a man-made ecological system]. *Nauchnye issledovaniya i innovatsii, Nauchnyy zhurnal — Scientific & practical journal «Modern scientific researches and innovations»*. Perm, PGTU Publ., 2010, no. 4, pp. 35–43.
- [4] *Ekserhiia — shliakh enerhozberezhennia* [Exergy as a way of energy conservation]. Mode of access: http://gazeta.dt.ua/ECONOMICS/eksergiya__shlyah_energozberezhennia.html.
- [5] *Eksergeticheskiy analiz termodinamicheskikh tsiklov* [Exergetic analysis of thermodynamic cycles]. Mode of access: <http://sergeyk.kiev.ua/tech/exergy/analysis/>.
- [6] Kazakov V. G., Lukanin P. V., Smirnova O. S. *Eksergeticheskie metody otsenki effektivnosti teplotekhnologicheskikh ustanovok* [Exergetic methods of estimation of thermal technology plant efficiency]. Saint-Petersburg, SPB GTURP Publ., 2013. 93 p.
- [7] Kuris Yu. V., Tkachenko S. I. *Analiz effektivnosti mirovogo energeticheskogo i ekologicheskogo ispolzovaniya biomassy* [Analysis of the effectiveness of the global energy and ecological use of biomass]. *Professionalnyy zhurnal «Promyshlennaya elektroenergetika» — Professional journal «Industrial Power Engineering»*. Kiev, 2008, no. 5, pp. 35–41.
- [8] Likhmanenko V. A., Tsvetkova I. V., Yushko V. L., Rusalina S. M. *Termokhimicheskie protsessy pererabotki otrabotannykh shin i otkhodov rezinotekhnicheskikh izdeliy* [Thermochemical processes of recycling the scrap tires and industrial rubber goods waste]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Issues of Chemistry and Chemical Technology], 2009, no. 1, pp. 129–132.
- [9] Moiseev G. K., Vyatkin G. P. *Termodinamicheskoe modelirovanie v neorganicheskikh sistemakh* [Thermodynamic modelling in nonorganic systems]. Chelyabinsk, South Ural State University Press, 1999. 256 p.
- [10] Pupyshev A. A. *Termodinamicheskoe modelirovanie termokhimicheskikh protsessov v spektralnykh istochnikakh* [Thermodynamic modelling of thermochemical processes in spectral sources]. *Uchebnoe elektronnoe tekstovoe izdanie GOU VPO «Ural. gos. tekhn. univ. — UPI»* [Educational electronic publication State Educational Institution of Higher Professional Education «Ural State Technical University — UPI»]. Yekaterinburg, 2007. 85 p.
- [11] Ryzhkov S. S., Markina L. M., Rudiuk M. V., Filatova M. I., Lytvynov I. V. *Eksperimentalna ustanovka dlia doslidzhennia protsesu bahatokonturnoho tsirkuliatsiinoho pirolizu* [Experimental plant for studying the process of multistage circulation pyrolysis]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*. Mykolaiv, NUS Publ., 2012, pp. 63–68.
- [12] Samsonov A. I. *Eksergeticheskiy analiz raboty teplovykh mashin. Protivorechiya i netochnosti v uchebnikakh po tekhnicheskoy termodinamike* [Exergetic analysis of thermal machines operation. Contradictions and inaccuracies in textbooks on engineering thermodynamics] *Korablestroenie, okeanotekhnika, voprosy ekonomiki* [Shipbuilding, Ocean Technology and Economics Issues]. Vladivostok, 2002, issue 25, pp. 21–22.
- [13] Sister V. G., Deminskiy M. A., Zhivotov V. K., Ivannikova Ye. M., Yamchuk A. I., Babaritskiy A. I., Demkin S. A., Korobtsev S. V., Potapkin B. V., Chebankov F. N. *Gazifikatsiya tverdykh uglerodov v rasplave metalla* [Gasification of solid carbons in molten metal]. *Zhurnal «Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie» — «Chemical and petroleum engineering» journal*, 2008, no. 10, pp. 32–36.

- [14] Sokolov Ye. Ya., Brodyanskiy V. M. *Energeticheskie osnovy transformatsii tepla i protsesov okhlazhdeniya* [Energy basics of heat transformation and cooling processes]. Moscow, 1981. 235 p.
- [15] Barton P. I., Allagor R. J., Feehery W. F., Galan S. Dynamic optimization in a discontinuous world. *Ind. Chen. Res.*, 1998, no. 37, pp. 966–981.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сутність технології багатоконтурного циркуляційного піролізу (БЦП) полягає в термічній деструкції органічної маси відходів, що являє собою термодинамічний процес зміни фізичних властивостей органічних відходів та перебіг хімічних реакцій в реакторі устаткування з утворенням великої кількості різних продуктів термічного розкладання, які в подальшому взаємодіють між собою, утворюючи нові речовини, що легко перетворюються один в одного з утворенням нових складних сполук.

Складність отримання детальної інформації про перебіг хімічних перетворень відходів при їх утилізації зумовлює необхідність вивчення термодинамічних процесів в реакторі для виявлення стійких умов та оптимальних параметрів проведення процесу БЦП для отримання кінцевих цільових продуктів з заданими характеристиками. Склад суміші кінцевих продуктів та їх термодинамічні стійкості в реакційній суміші можуть бути визначені термодинамічним контролем та аналізом.

Застосування законів термодинаміки при дослідженні процесів термічної деструкції органічних відходів в БЦП необхідне для проведення термодинамічних (ТД) розрахунків, що дозволяють передбачити можливість їх перетворення, визначити діапазони тиску та температур, в яких найбільш вигідно проводити процес утилізації, розрахувати запланований вихід продуктів деструкції, а також для оцінки енергетичної ефективності хіміко-технологічного процесу утилізації відходів за технологією БЦП.

Для визначення максимальної енергетичної ефективності роботи БЦП загалом, а також для оцінки втрат енергії використовується загальний термодинамічний метод аналізу — ексергетичний, що враховує не тільки кількість споживаної енергії та енергії, що віддається ТД системою, але і якість цієї енергії, тобто здатність її бути перетвореною на корисну роботу.

Ексергетичний метод є універсальним способом термодинамічного дослідження перетворення енергії у енерготехнологічній системі БЦП, що дає можливість підвищити ефективність роботи технології в цілому. Ексергія являє собою важливий універсальний показник ефективності енергоресурсів і виробленої продукції [4]. Застосування ексергії, враховуючи її зв'язок з економікою, дозволяє порівняно просто і однозначно вирішити одне важливе питання — вибір критерію ефективності при оцінці і оптимізації БЦП, результатом чого є знаходження ексергетичного ККД процесу [15].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Процеси термічної деструкції органічних відходів в даний час вивчені недостатньо повно, тому важко передбачити спектр продуктів термічного розкладання в результаті їх утилізації, навіть знаючи будову та умови піролізу відходів.

Огляд та аналіз публікацій, що стосується термодинамічних досліджень при термічній деструкції відходів, включає в себе результати термохімічної переробки зношених шин та гумотехнічних відходів за вказаною технологією [8] в середовищі відновлюваного газу, а також при газифікації [13] та спалюванні відходів [1]. Однак дані дослідження не охоплюють різні види органічних відходів та не передбачують їх утилізацію саме безкисневим термічним методом, тобто піролізом, що вказує на доцільність проведення термодинамічного дослідження саме для технології БЦП, що не має аналогів у світі.

При термодинамічному дослідженні реакцій деструкції органічної маси відходів, що являє собою аналіз сукупних послідовних станів, через які проходить термодинамічна система БЦП при зміні технологічних режимів, можна розрахувати енергетичні характеристики реакцій, а також визначити особливості роботи устаткування БЦП для отримання кінцевих продуктів необхідної якості [14].

МЕТОЮ СТАТТІ є проведення термодинамічного аналізу процесу термічної утилізації різних видів органічних відходів за технологією БЦП для отримання оцінки ексергетичної ефективності технології у вигляді коефіцієнту корисної дії.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Дослідження процесу деструкційної переробки органічних відходів за технологією багатоконтурного циркуляційного піролізу (БЦП) полягає у побудові достовірних математичних моделей окремих процесів та явищ, які характеризують перетворення відходів в реакційному об'ємі.

Математичне моделювання БЦП проводиться на основі блочного методу, згідно з яким модель формується з окремих її частин (блоків) [2]. На рис. 1 представлено загальну математичну модель БЦП з урахуванням закономірностей елементарних процесів, що пов'язані між собою.

В даному дослідженні вивчаються теплові процеси, як частина блоку теплового балансу, а саме термодинамічні функції, що характеризують здійснення процесу утилізації відходів за технологією БЦП.

В ході роботи проведено теоретичне термодинамічне моделювання піролізу різних видів органічних відходів — гумових відходів, пластмаси, харчових відходів, відпрацьованого мастила. Вихідними даними для дослідження слугували основні параметри реактору БЦП та загальні умови проведення процесу утилізації з мінімальним вмістом в реакторі кисню 0,05% (табл. 1) [11], а також брутто формули вихідної маси відходів за даним Зайцевої Т. А., професора Пермського державного технічного університету [3].

Дослідження та розрахунок термодинамічних процесів, що проходять при утилізації відходів за технологією БЦП, проводилося на основі комп'ютерного моделювання деструктивних перетворень за допомогою програмного комплексу Астра 4. Комп'ютерна програма Астра 4, основана на принципі максимізації ентропії системи [10], дозволяє в автоматичному режимі розрахувати основні термодинамічні параметри процесу термічного розкладання різних видів органічних відходів при різних умовах здійснення процесу.

Термодинамічні процеси в системі БЦП зумовлюють стан та вихід продуктів деструкції початкової маси відходів, тому було проаналізовано основні ек-

тенсивні термодинамічні параметри, а саме загальний коефіцієнт теплопровідності (LT), внутрішню енергію (U), ентальпію (I) та ентропію (S) [9].

Як результат дослідження та розрахунків були побудовані графіки зміни термодинамічних показників в залежності від температури, що представлені нижче.

Теплопровідність — один з найбільш важливих параметрів речовин і матеріалів, оскільки він описує процес переносу теплоти і зміну температури в них. Зміна значення повного коефіцієнту теплопровідності залежно від заданої температури показана на рис. 2.

Найбільше значення повного коефіцієнту теплопровідності має відпрацьоване масло та харчові відходи — 5,3 Вт/м·К та 4,8 Вт/м·К, найменше значення — пластмаса — 2,1 Вт/м·К, що відповідає інтервалу температур 560–580 °С, що означає підвищення ефективності теплопередачі, а відповідно і масопередачі та швидкості прогрівання в даному інтервалі.

Піроліз — це ендотермічна термодинамічна система, і відповідно до першого закону термодинаміки відбувається зменшення внутрішньої енергії в системі, а відповідно, і значення ентальпії.

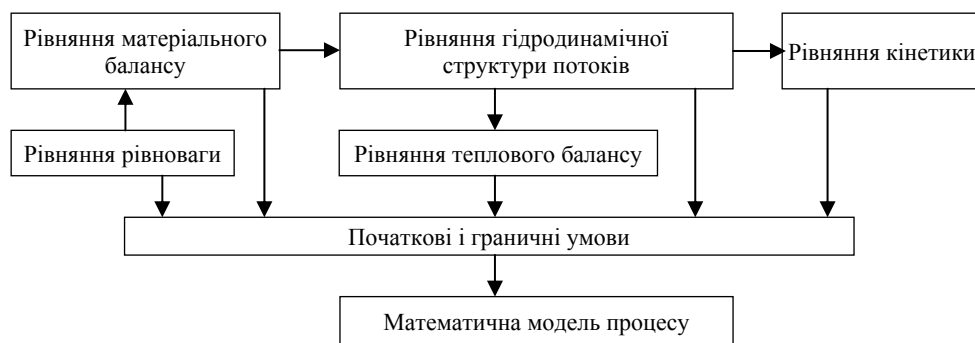


Рис. 1. Схема загальної математичної моделі БЦП

Таблиця 1. Технологічні параметри реактору ЕУ БЦП-14

Параметр	Показник	Вплив
Об'єм реактора (V)	0,014 м ³	Селективність процесу
Тиск (P)	0,1013 мПа	Характер проходження реакції
Температура (T)	450–600 °С	Ступінь розкладу та розподілу сировини, швидкість проходження реакції

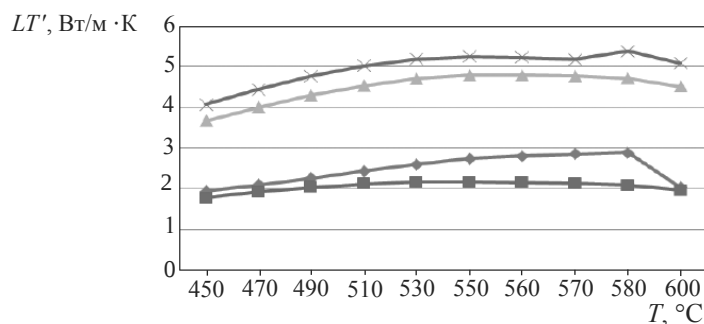


Рис. 2. Залежність повного коефіцієнту теплопровідності від температури для різних видів відходів:

♦ — гума; ■ — пластмаса; ▲ — харчові відходи; × — відпрацьоване мастило

Аналізуючи графіки внутрішньої енергії (рис. 3) та ентальпії (рис. 4), можна зробити висновки, що процес інтенсивніше відбувається з 560 °С.

Рушійною силою піролізу є ентропійний фактор (рис. 5), утворення летких сполук і низькомолекулярних продуктів термічного розпаду. Ентропія зростає зі збільшенням температури, відповідно відбувається прискорення процесу переходження тіла з одного агрегатного стану в інший — утворення нових продуктів (парогазової суміші та конденсованої фракції).

Найбільші значення ентропії спостерігаються при піролізі біологічних відходів та гуми до 9,75 кДж/кг та 10,1 кДж/кг відповідно. Найменші значення ентропії має піроліз пластмаси в межах до 7,4 кДж/кг. Чим швидше відбувається розігрів реактору, тим швидше зростає ентропія, починаючи з 550 °С спостерігається стрімке підвищення ентропії, тобто процес інтенсифікується.

Подальше дослідження ґрунтоване на визначенні концентрації основних компонентів пірогазу, що показано у вигляді залежності їх концентрації від температури для різних типів відходів.

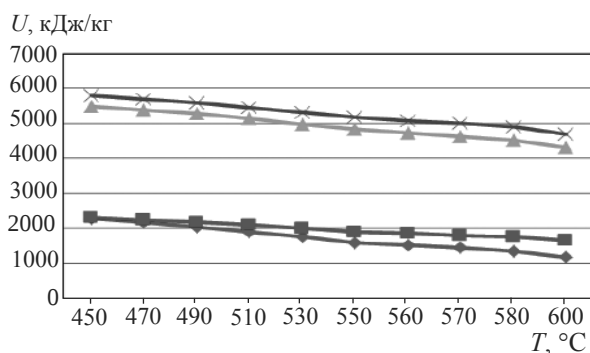


Рис. 3. Зміна внутрішньої енергії залежно від зміни температури при піролізі різних видів відходів:

— гума; — пластмаса; — харчові відходи; — відпрацьоване мастило

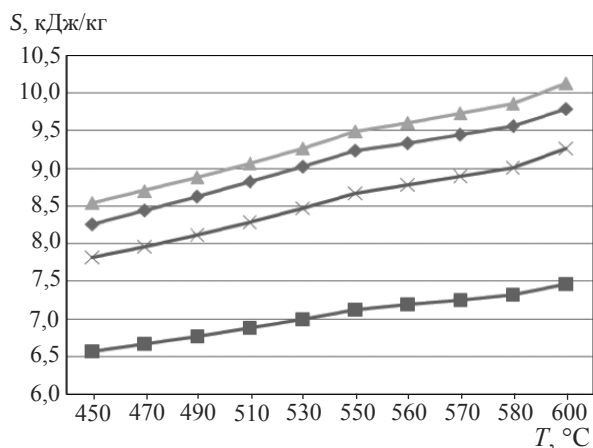


Рис. 5. Зміна значення ентропії залежно від зміни температури при піролізі різних видів відходів:

— гума; — пластмаса; — харчові відходи; — відпрацьоване мастило

Вихід компонентів залежить від виду відходів, так, найбільший вихід теплотворних компонентів спостерігається при піролізі гуми, меншою мірою при піролізі харчових відходів, а найменші значення спостерігаються при піролізі відпрацьованого мастила та при піролізі пластмаси: вихід CH_4 (рис. 6) знаходиться в межах 1,2 – 13,778 моль/кг, етану (рис. 7) — $(1,8 - 13,8) \cdot 10^{-5}$ моль/кг.

Також при підвищенні температури збільшується масова концентрація водню (H_2) (рис. 8) — 0,9366 – 25,407 моль/кг, оксиду сірки (CO) (рис. 9) — 0,11792 – 1,7929 моль/кг, проте зменшується вихід сірководню (H_2S) (рис. 10), при піролізі гуми 0,13758 – 0,1372 моль/кг, пластмаси — 0,1048 – 0,1036 моль/кг та харчових відходів до 0,1286 моль/кг. Це означає, що відбувається глибока деструкція вихідної маси.

Встановлено, що при підвищенні температури зменшується концентрація виходу основних теплотворних компонентів пірогазу, а відповідно і зменшується молекулярна маса ПГС.

Досліджено особливості та динаміку виходу основних теплотворних компонентів пірогазу залеж-

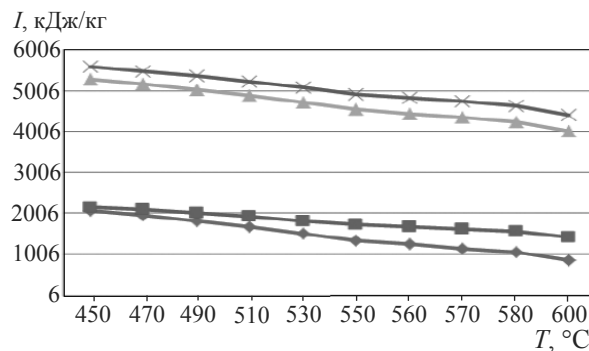


Рис. 4. Зміна значення ентальпії залежно від зміни температури при піролізі різних видів відходів:

— гума; — пластмаса; — харчові відходи; — відпрацьоване мастило

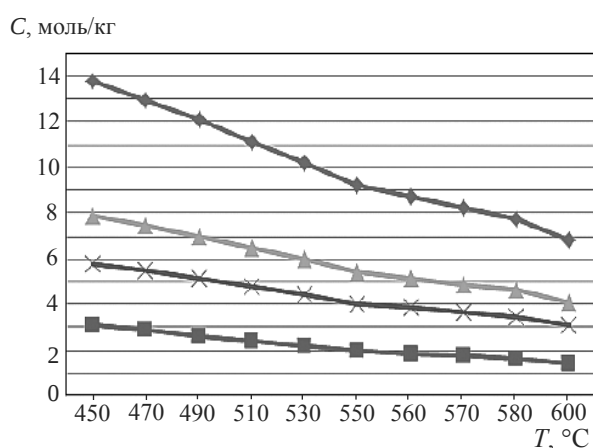


Рис. 6. Вихід метану при піролізі різних видів відходів:

— гума; — пластмаса; — харчові відходи; — відпрацьоване мастило

но від температурного режиму та молекулярної маси продуктів деструкції органічних відходів, що піддаються утилізації за технологією БЦП.

Молекулярна маса — одна з найважливіших характеристик будь-якого високомолекулярного з'єднання. При підвищенні температури відбувається зниження молекулярної маси ПГС, що спостерігається на рис. 11.

Найбільшу молекулярну масу ПГС має при піролізі пластику близько 24 моль/кг при 450 °С, потім знижується до 22 моль/кг в інтервалі 550 – 600 °С,

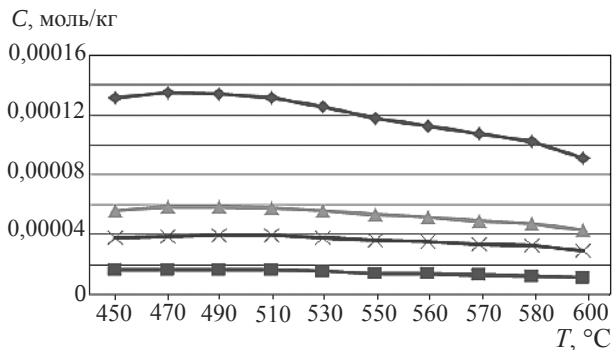


Рис. 7. Вихід етану при піролізі різних видів відходів:

— гума; — пластмаса; — харчові відходи; — відпрацьоване мастило

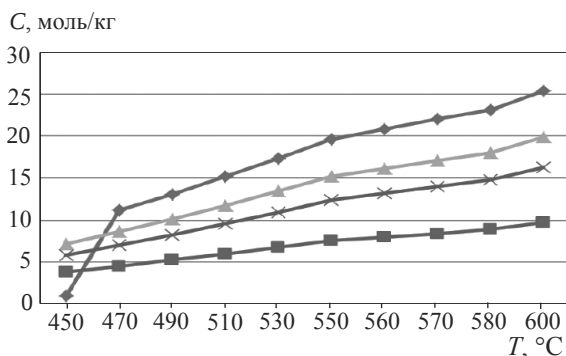


Рис. 8. Вихід водню при піролізі різних видів відходів:

— гума; — пластмаса; — харчові відходи; — відпрацьоване мастило

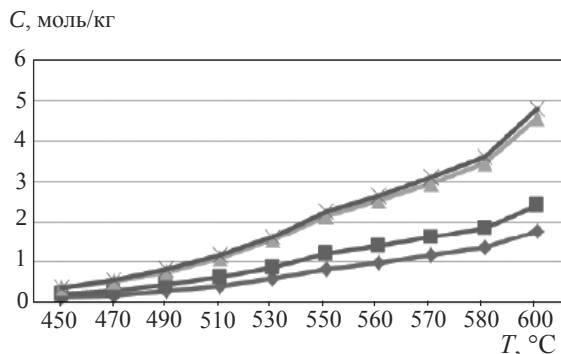


Рис. 9. Вихід оксиду вуглецю при піролізі різних видів відходів:

— гума; — пластмаса; — харчові відходи; — відпрацьоване мастило

найменша молекулярна маса ПГС при піролізі гуми — вона зменшується з 14,2 моль/кг до 10 моль/кг. Зі зменшенням молекулярної маси збільшується вміст легких вуглеводнів в складі ПГС. Отримані експериментальні результати показали, що при первинному піролізі незалежно від складу сировини відбувається значне зниження молекулярної маси приблизно до 1500 – 2000 (рис. 12). Таке різке зниження характерно для всіх сумішей незалежно від процентного вмісту будь-якої речовини.

Отримані результати термодинамічних параметрів при піролізі відходів за технологією БЦП зведено до таблиці 2, що включає в себе показники процесу, при якому відбувається інтенсифікація деструкції та здійснюється повна конверсія початкової маси відходів у кінцеві продукти з потрібною концентрацією, що є основою для визначення оптимального температурного інтервалу здійснення процесу БЦП. Також отримані дані є основою для продовження дослідження процесу і використання при розрахунку ексергетичного балансу системи.

Отримані термодинамічні показники було використано для оцінки енергетичної ефективності хіміко-технологічного процесу утилізації відходів за технологією БЦП, яка розрахована ексергетичним методом ТД аналізу.

Ексергетичний метод термодинамічного аналізу використовується для обліку втрат енергії в устаткуванні БЦП за рахунок незворотного протікання реальних процесів. При цьому фактична робота при проходженні процесу деструкції зрівнюється з максимальною кількістю роботи, яку можна використати для повної деструкції відходів за рахунок її внутрішньої енергії і підведеної до неї первинної енергії [7].

Ексергія — частина енергії, що дорівнює максимальній корисній роботі, яку може зробити термодинамічна система при переході з даного стану в стан рівноваги з навколишнім середовищем.

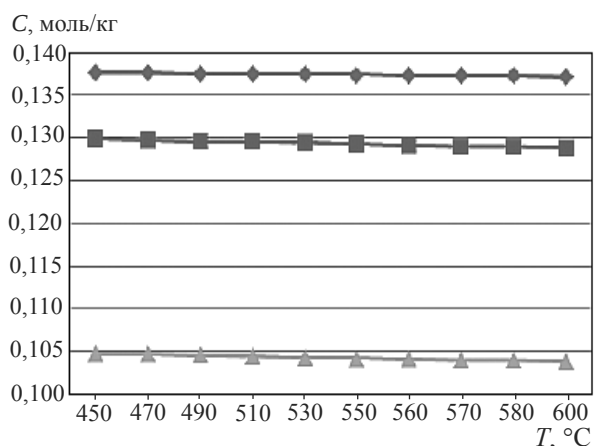


Рис. 10. Вихід сірководню при піролізі різних видів відходів:

— гума; — пластмаса; — харчові відходи; — відпрацьоване мастило

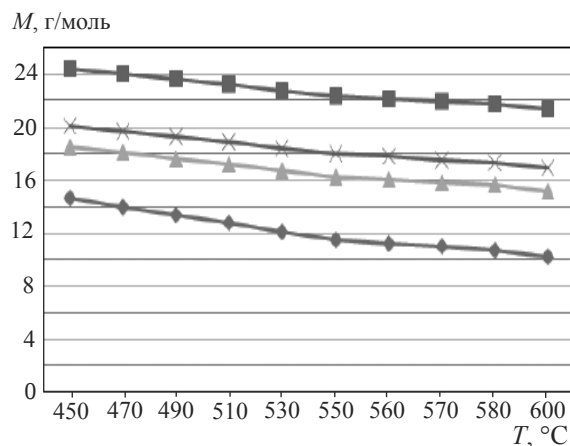


Рис. 11. Зміна середньої молекулярної маси первинної ПГС від температури для різних видів відходів:

— ром — гума; — квадрат — пластмаса; — трикутник — харчові відходи; — хрест — відпрацьоване мастило

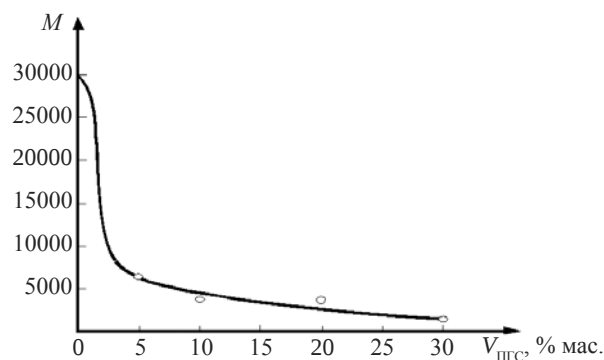


Рис. 12. Зміна молекулярної маси рідкої фракції для різних видів відходів

Таблиця 2. Кінцеві характеристики процесу утилізації відходів за технологією БЦП

Параметр	Показник	Оптимальний температурний режим (°C)	Характеристика
Повний коефіцієнт теплопровідності LT'' , Вт/м·К	4,8–5,3	560–580	Збільшення швидкості прогрівання
Внутрішня енергія U , кДж/кг	5000–1000	3 560	При зменшенні процес інтенсифікується
Ентальпія I , кДж/кг	5000–1000	з 560	При зменшенні процес інтенсифікується
Ентропія S , кДж/кг	7,4–10,1	з 560	Прискорення процесу переходження тіла з одного агрегатного стану в інший (утворення нових продуктів)
Молекулярна маса $M_{ПГС}$, моль/кг	10–22	560–600	Зі зменшенням молекулярної маси збільшується вміст легких вуглеводнів в ПГС

Рівняння ексергетичного балансу засновані на спільному використанні першого і другого законів термодинаміки і по суті виражають принцип убавання ексергії ізольованої системи при протіканні в ній необоротних процесів.

Ексергію потоку можна визначити за наступною формулою, що пов'язує кількості роботи $I_0^{\max}$ і теплоти при переході від стану в точці 1 до стану 0 (початкові умови), має вигляд:

$$I_0^{\max} = (I - I_0) - T_0(s - s_0) = \mathcal{E}, \text{ кДж},$$

де $\mathcal{E}$ — ексергія, яка є функцією працездатності робочого тіла в системі; I — значення питомої ентальпії в характерних точках процесу деструкції органічної маси відходів, кДж/кг; I_0 — значення питомої ентальпії процесу в стані T_0, p_0 (температура і тиск навколишнього середовища), кДж/кг; S та S_0 — відповідні значення ентропії, кДж/(кг·К).

При фіксованих значеннях T_0 і p_0 ексергія робочого тіла ($\mathcal{E}$) залежить тільки від його початкового стану, тобто ексергія є функцією стану системи при заданих температурі і тиску в навколишньому середовищі.

Робота, що здійснюється робочим тілом в установці, зазвичай менше максимальної корисної роботи $I_n^{\max}$ на величину ексергії робочого тіла, що покидає систему — $\mathcal{E}_2$.

Вираз для розрахунку максимальної корисної роботи, яка може бути отримана від термодинамічної системи БЦП, прийме вигляд:

$$I_n^{\max} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_q,$$

де $\mathcal{E}_1$ — ексергія робочого тіла на вході в ТД системи відповідно виразу (1), кДж; $\mathcal{E}_2$ — ексергія робочого тіла на виході з ТД системи, кДж.

$\mathcal{E}_q$ — це ексергія, яка є функцією працездатності теплоти, кДж, що розраховується відповідно формулі:

$$\mathcal{E}_q = q - T_0 \int \frac{\delta q}{T}.$$

Незворотність процесів перетворення енергії призводить до зменшення максимальної корисної роботи, що віддається споживачу, $I_n^{\max}$, на величину ексергетичних втрат:

$$\Pi = T_0 \Delta s_{\Sigma}^I.$$

З урахуванням цих втрат фактична працездатність устаткування БЦП буде дорівнювати:

$$I_{\Pi} = I_{\Pi}^{\max} - T_0 \Delta s_{\Sigma}^I.$$

Для оцінки впливу незворотності процесів перетворення енергії на втрати корисної роботи може використовуватися метод ексергетичних потоків. Відповідно до цього методу рахуються потоки ексергії робочих тіл, що входять в систему ($\mathcal{E}_1$), ексергії теплоти, що підводиться ($\mathcal{E}_q$), ексергії робочих тіл, що виходять з системи ($\mathcal{E}_2$).

Ексергетичний баланс, на підставі якого встановлюється масштаб використання сировинних і енергетичних ресурсів, вказує на можливість підвищення коефіцієнта корисної дії процесу. Таким чином, термодинамічна досконалість системи характеризується ексергетичним коефіцієнтом корисної дії (ККД):

$$\eta_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\Pi} / \mathcal{E}_q,$$

де $\mathcal{E}_{\Pi}$ — корисно використовувана ексергія, що перетинає межу системи; $\mathcal{E}_q$ — затрачувана ексергія ($\mathcal{E}_q$).

Аналізуючи отримані дані, можна стверджувати, що при збільшенні температури роботи реактору БЦП

до 600 °С збільшується ефективність роботи установки переробки органічних відходів ($I_{\Pi}^{\max}$) в межах:

- при піролізі гуми 111171 – 172304 кДж;
- піролізі пластмаси 111493 – 172007 кДж;
- при піролізі харчових відходів 114801 – 176480 кДж;
- при піролізі відпрацьованого мастила 114592 – 176481 кДж,

що виражається ексергією, тобто відбувається збільшення максимально корисної роботи, що можна отримати від підведеної теплоти до реактора. При підвищенні «працездатності» ТД системи БЦП збільшується відповідно і глибина деструкції складних вуглеводневих відходів.

Ексергетичний ККД системи БЦП для деструкції різних видів відходів становить:

- при піролізі гуми 66,00%;
- при піролізі пластмаси 66,3%;
- при піролізі харчових відходів 67,80%;
- при піролізі відпрацьованого мастила 67,8%.

Для порівняння приведемо показники ексергетичного ККД різних технічних систем (табл. 4) [6].

Таблиця 3. Результати ексергетичного аналізу реактору деструкції органічних відходів при різних температурних режимах за технологією БЦП

Вид відходів	Інтервал температур, °С	S_{0^*} , кДж/кг	S , кДж/кг	I_{0^*} , кДж/кг (–)	I , кДж/кг (–)	$\mathcal{E}_1$, кДж	$\mathcal{E}_2$, кДж	$\mathcal{E}_q$, кДж	$I_{\Pi}^{\max}$, кДж	I_{Π} , кДж	П, кДж	η_{Σ} , %
Гума	450	2,0	8,50	8024	2006	4260	45819	152730	111171	170033	2271	66,00
	550	2,0	9,25	8024	1206	6811	5148	165375	167038			
	600	2,0	9,75	8024	906	6810	5118	170612	172304			
Пластмаса	450	1,6	6,50	8024	2006	4582	45819	152730	111493	170278	1729	66,30
	550	1,6	7,10	8024	1806	6213	5148	165375	166440			
	600	1,6	7,50	8024	1506	6513	5118	170612	172007			
Харчові відходи	450	2,0	8,50	15000	5206	7890	45819	152730	114801	174209	2271	67,8
	550	2,0	9,50	15000	4506	10488	5148	165375	170715			
	600	2,0	10,10	15000	4006	10986	5118	170612	176480			
Відпрацьоване мастило	450	1,9	7,75	15001	5606	7681	45819	152730	114592	174181	2300	67,8
	550	1,9	8,60	15001	4506	10487	5148	165375	170714			
	600	1,9	9,75	15001	4006	10987	5118	170612	176481			

Таблиця 4. Ексергетичні ККД різних технічних систем

Назва технічної системи	Показник ексергетичного ККД
Конденсаційна електростанція (КЕС)	39 – 42
Парогенератор	38 – 50
Парокомпресійна холодильна установка	30 – 35
Парокомпресійний тепловий насос	35 – 40
Піролізна установка для отримання альтернативного палива з біомаси	57 – 60
ЕУ-БЦП 14	66 – 67,8

ВИСНОВКИ. Проведено аналіз основних термодинамічних процесів термічної деструкції при утилізації різних видів органічних відходів за технологією багатоконтурного циркуляційного піролізу на основі комп'ютерного моделювання деструктивних перетворень за допомогою програмного комплексу Астра 4. Таким чином, було розраховано основні термодинамічні параметри процесу термічного розкладання відходів при різних умовах здійснення процесу утилізації.

Результатом даних розрахунків є визначення оптимального температурного інтервалу для утилізації відходів за технологією БЦП, що складає 560–600 °С, в межах якого здійснюється інтенсифікація деструктивних перетворень, а також спостерігається вихід цільових теплотворних компонентів пірогазу. Також зроблено висновок, що незалежно від складу сировини відходів вихід компонентів, а відпо-

відно і молекулярна маса ПГС зменшується, досягаючи повної деструкції вихідної маси відходів.

Проведено оцінку ексергетичної ефективності технології на основі розрахунку ексергетичного ККД реактора для визначення витрат теплової енергії при деструкції органічної маси відходів. Встановлено, що ексергія кількісно характеризує енергію будь-якого виду, дозволяє оцінити її якісну сторону, затрати енергії на роботу установки ЕУ-БЦП 14 становлять 256,8 МДж, а прихід 487,2 МДж (рідкий продукт), що встановлює енергетичну ефективність реактора в межах 189,7%.

Досліджено, що підведення температури до реактора призводить до збільшення корисної роботи ТДМ системи БЦП до 176480 кДж (при піролізі гуми) та до 172304 кДж (при піролізі харчових відходів).

Встановлено, що ексергетичний ККД сягає 66,00–67,8%, що є досить високим показником в порівнянні з іншими технологічними тепловими установками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Балан, Р. К.** Термодинамический анализ газификации и сжигания твердых бытовых отходов в атмосфере кислорода [Текст] / Р. К. Балан, А. А. Татыбеков, В. С. Энгельшт // Известия НАН КР, Бишкек. — 2007. — № 4. — С. 68–75.
- [2] **Бельков, В. П.** Математические модели химико-технологических процессов. Часть 2 [Текст] / В. П. Бельков, В. В. Шестопалов, В. В. Кафаров. — М.: Моск. хим.-технол. ин-т им. Д. И. Менделеева, 1981. — 40 с.
- [3] **Зайцева, Т. А.** Полигон депонирования твердых бытовых отходов (ТБО) как антропогенная экологическая система [Текст] / Т. А. Зайцева // Научные исследования и инновации: Научный журнал. — Пермь: ПГТУ, 2010. — № 4. — С. 35–43.
- [4] Ексергія — шлях енергозбереження [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://gazeta.dt.ua/ECONOMICS/eksergiya_shlyah_energozberezhennya.html.
- [5] Ексергетический анализ термодинамических циклов [Електронный ресурс]. Режим доступа: <http://sergeyk.kiev.ua/tech/exergy/analysis>.
- [6] **Казаков, В. Г.** Эксергетические методы оценки эффективности теплотехнологических установок [Текст] / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, О. С. Смирнова — СПб: СПб ГТУРП, 2013. — 93 с.
- [7] **Курис, Ю. В.** Анализ эффективности мирового энергетического и экологического использования биомассы [Текст] / Ю. В. Курис, С. И. Ткаченко // Профессиональный журнал «Промышленная электроэнергетика». — Киев, 2008. — № 5. — С. 35–41.
- [8] **Лихманенко, В. А.** Термохимические процессы переработки отработанных шин и отходов резинотехнических изделий [Текст] / В. А. Лихманенко, И. В. Цветкова, В. Л. Юшко, С. М. Русалин // Вопросы химии и химической технологии, 2009. — № 1. — С. 129–132.
- [9] **Моисеев, Г. К.** Термодинамическое моделирование в неорганических системах [Текст] / Г. К. Моисеев, Г. П. Вяткин // Научное издание. — Челябинск: изд-во Южно-Уральского государственного университета, 1999. — 256 с.
- [10] **Пупышев, А. А.** Термодинамическое моделирование термохимических процессов в спектральных источниках [Текст] / А. А. Пупышев // Учебное электронное текстовое издание ГОУ ВПО «Урал. гос. тех. ун-в. — УПИ». — Екатеринбург, 2007. — 85 с.
- [11] **Рижков, С. С.** Експериментальна установка для дослідження процесу багатоконтурного циркуляційного піролізу [Текст] / С. С. Рижков, Л. М. Маркіна, М. В. Рудюк, М. І. Філатова, І. В. Литвинов // Зб. наук. праць. — Миколаїв: НУК, 2012. — № 1. — С. 63–68.
- [12] **Самсонов, А. И.** Эксергетический анализ работы тепловых машин. Противоречия и неточности в учебниках по технической термодинамике [Текст] / А. И. Самсонов // Кораблестроение, океанотехника, вопросы экономики. — Владивосток, 2002. — Вып. 25. — С. 21–22.
- [13] **Систер, В. Г.** Газификация твердых углеродов в расплаве металла [Текст] / В. Г. Систер, М. А. Деминский, В. К. Животов, Е. М. Иванникова, А. И. Ямчук, А. И. Бабарицкий, С. А. Дёмкин, С. В. Коробцев, Б. В. Потапкин, Ф. Н. Чебаньков // Журнал «Химическое и нефтегазовое машиностроение». — 2008. — № 10. — С. 32–36.
- [14] **Соколов, Е. Я.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения [Текст] / Е. Я. Соколов, В. М. Бродянский. — М., 1981. — 235 с.
- [15] **Barton, P. I.** Dynamic optimization in a discontinuous world [Text] / P. I. Barton, R. J. Allagor, W. F. Feehery, S. Galan // Ind. Chem. Res., 1998. — № 37. — Pp. 966–981.

© С. С. Рижков, Л. М. Маркіна, М. С. Крива, В. В. Глиняна

Надійшла до редколегії 14.08.2015

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПІ» М. Д. Гомеля