

КОСИЮК М. М.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4823-7800>e-mail: kosiyukm@khnmu.edu.ua

КОГЕНЕРАЦІЙНА УСТАНОВКА НА ОСНОВІ ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

В роботі розглянуто питання створення ефективних та екологічно чистих енергосистем на основі технології когенерації. Пропонується когенераційна установка на основі екологічно безпечної ресурсозберігаючої технології надкритичної гідротермальної деструкції органічних відходів. Автотермічні режими деструкції органічних відходів при надкритичних параметрах водного середовища призводять до отримання високоентальпійної парогазової суміші, яка може бути використана у схемах автономного енергетичного комплексу. Когенераційна установка може використовуватися для вирішення енергоефективної та екологічно безпечної утилізації органічних відходів. Дозволяє розв'язувати задачі автономного електро- і теплопостачання промислових та житлових об'єктів і має значний ринковий потенціал.

Ключові слова: теплоенергетика, енергоефективність, когенерація, відновлювані джерела енергії надкритичний стан води, деструкція, окислення.

Mykola KOSIYUK

Khmelnitskyi National University

COGENERATION DEVICE BASED ON INNOVATIVE TECHNOLOGY ORGANIZATION OF ORGANIC WASTE

This work considers the issue of creating efficient and environmentally friendly energy systems based on cogeneration technology. In industrialized countries, work is underway to develop and implement innovative technology for supercritical hydrothermal destruction of industrial and household waste and highly toxic substances. An extremely important urgent task is the complex solution of the problems of creating an autonomous energy complex based on the technology of cogeneration and utilization of organic waste and their use as renewable energy sources. Theoretical and experimental studies have shown that the method of supercritical hydrothermal destruction has high environmental and economic efficiency and demonstrates versatility, providing complete one-stage disposal of any organic waste. It is established that the reaction of supercritical aqueous oxidation of organic matter is exothermic and in the presence of only 15-20% of organic matter the waste processing process becomes autothermal.

Autothermal modes of destruction of organic waste at supercritical parameters of the aquatic environment lead to a high-enthalpy vapor-gas mixture, which can be used in the schemes of the autonomous energy complex. Cogeneration units are offered on the basis of a steam power plant operating on the Rankin cycle and on the basis of a heat engine with external heat supply, which operates on a closed thermodynamic Stirling cycle. A non-standard equipment of supercritical hydrothermal destruction technology is a quasi-flow reactor. The conducted research testifies to the possibility of further development of supercritical hydrothermal destruction technologies, both in terms of providing increased process parameters and in terms of developing increasingly reliable, productive and safe types of reactors. The development is based on the replacement of a single-pipe coaxial (two-pipe) reactor. This reactor design significantly expands the temperature and barometric performance characteristics, allows to increase the heat transfer surface and the temperature inside the reactor, bringing it closer to the external temperature of the reactor wall surface while maintaining performance. The cogeneration unit can be used to solve energy efficient and environmentally friendly disposal of organic waste. Allows to solve problems of autonomous electricity and heat supply of industrial and residential facilities and has significant market potential.

Key words: heat energy, energy efficiency, cogeneration, renewable energy sources, supercritical state of water, destruction, oxidation.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У провідних країнах світу здійснюється перехід на новий технологічний рівень, пов'язаний з енергозбереженням і скороченням використання традиційних ресурсів. Швидке виснаження основних енергоресурсів та їх стрімке подорожчання вимагають впровадження ефективних і екологічно чистих енергосистем. З початку XXI століття в енергетиці з'явилася єдина енергетичною системою (ЄЕС), що об'єднує генерацію потужних теплових, атомних та гідроелектростанцій, позначилася тенденція масового будівництва джерел електроенергії невеликої потужності. Це обумовлено зростаючою вартістю послуг підключення до ЄЕС на тлі зниження надійності та якості централізованого енергопостачання, виснаження природних енергоресурсів та необхідності вирішення екологічних проблем [1, 2]. Світове зростання споживання енергії та обмеженість запасів мінеральних палив, з одного боку, високе поширення та відносно рівномірний розподіл відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), з іншого боку, означають, що в найближчій історичній перспективі привабливість ВДЕ буде неухильно зростати.

Відходи є однією з головних проблем на шляху стабільного розвитку економіки та суспільства в цілому. Людство утворює відходи, як у результаті своєї економічної діяльності, так і у результаті побутового повсякденного життя. Широке залучення вторинних енергетичних ресурсів, якими можуть виступати відходи, є дуже перспективним. Важливим є те, що раціональна утилізація позитивно позначається на екологічній безпеці.

Надзвичайно важливим актуальним завданням є комплексне вирішення проблем створення автономного енергетичного комплексу на основі технології когенерації та утилізації органічних побутових і промислових відходів і використання їх в якості відновлювальних джерел енергії.

Аналіз останніх досліджень чи публікацій

Існуючі нині підходи до знищення високотоксичних речовин шляхом їх спалювання, поховання, хімічної та біологічної переробки дуже дорогі і не універсальні. В промислово розвинених країнах ведуться роботи з розробки і впровадження у різних галузях перспективної інноваційної технології надкритичної гідротермальної деструкції (ГТД) відходів та високотоксичних речовин, яка ґрунтується на властивостях води, які вона набуває при температурі $T > 374^{\circ}\text{C}$ та тиску $P > 22,1$ МПа. Завдяки зміні своїх властивостей (зміна полярності, прискорення дифузії та ін.) у надкритичній воді виникає унікальна здатність розчиняти більшість органічних речовин. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень показано, що технологія надкритичної ГТД може претендувати на високу екологічну та економічну ефективність та демонструє при цьому універсальність, забезпечуючи повне одностадійне окислення будь-яких органічних речовин до нешкідливих продуктів та виділення з розчину неорганічних сполук у вигляді солей чи оксидів без небезпеки забруднення довкілля. Однією з основних переваг надкритичної ГТД є відсутність стадії попереднього сушіння вихідної сировини. Відходи можуть подаватися в реактор у вологому стані, наприклад, у вигляді водної суспензії, пульпи або розчину. Об'єктами застосування технології надкритичної ГТД можуть бути комунальні, промислові та інші рідкі стоки, що містять відходи нафтопереробної, хімічної, целюлозно-паперової, харчової, біологічної та фармацевтичної промисловості [3–7].

Встановлено, що реакція надкритичного водного окислення органіки екзотермічна і за наявності лише 15–20 % органічної речовини процес переробки відходів стає автотермічним. Автотермічні режими деструкції органічних відходів при надкритичних параметрах водного середовища призводять до отримання високоентальпійної парогазової суміші, яка може бути використана у схемах автономного енергетичного комплексу (при згорянні 1 кг бензину виділяється 40 Мдж тепла, а при окислюванні 1 кг будь-якої органіки до 20 Мдж тепла). Таким чином, органічні відходи можуть стати альтернативним паливом [5–7].

Формулювання цілей статті

Мета роботи – узагальнення результатів роботи з розробки когенераційної установки (КУ), що забезпечує знешкодження органічних відходів гідротермальним окислюванням у надкритичному середовищі з вирішення задач автономного електро- і теплопостачання промислових та житлових об'єктів.

Виклад основного матеріалу

Пропонуються КУ на основі паросилової установки, яка працює за циклом Ранкіна і на основі теплового двигуна із зовнішнім підведенням тепла, який працює за замкненим термодинамічним циклом Стірлінга. Вони належить до галузей теплоенергетики та екології, зокрема до устаткування для знешкодження органічних відходів і можуть знайти застосування при створенні автономного енергетичного комплексу для забезпечення об'єктів малої розподіленої енергетики тепловою та електричною енергією. Блок схеми КУ зображені на рис. 1.

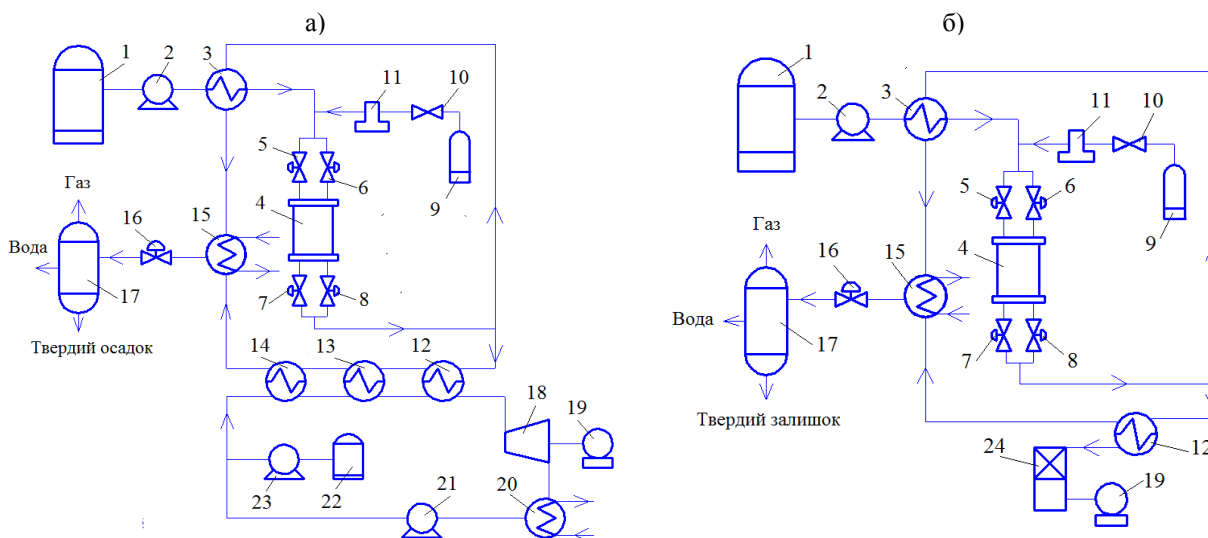


Рис. 1. Блок схеми КУ:

а) на основі паросилової установки, яка працює за циклом Ранкіна; б) на основі теплового двигуна із зовнішнім підведенням тепла, який працює за замкненим термодинамічним циклом Стірлінга, де 1 - місткість з органічними відходами (суспензія, емульсія, розчин); 2 - насос високого тиску; 3 - підігрівач; 4 - реактор надкритичної ГТД; 5, 6, 7, 8 - клапанні пристрої; 9 - місткість для окислювача; 10 - клапанний пристрій; 11 - компресор; 12 - пароперегрівач (теплообмінник); 13 - випарник (теплообмінник); 14 - економайзер (теплообмінник); 15 - конденсатор; 16 - клапанний пристрій; 17 - сепаратор; 18 - парова турбіна (паровий двигун, наприклад, поршневий, роторний, роторно-лопатевий); 19 - електрогенератор; 20 - конденсатор; 21 - насос води; 22 - місткість з водою; 23 - насос; 24 - двигун Стірлінга

Ефективність будь-якої технології, у тому числі і технології надкритичної ГТД багато в чому залежить від складу обладнання, що використовується. Нестандартним обладнанням цієї технології є реактор - посуд високого тиску, який працює у квазіпроточному режимі. Розробка та виготовлення таких реакторів вимагають нестандартних конструкторських і технологічних рішень, оскільки надкритичне водне

середовище гарантовано досягається при тиску більше 22 МПа і температурі не нижче 374°C. Найбільшого ефекту у вирішенні проблеми теплообміну можна досягти конструкторськими рішеннями при вдосконаленні конструкції реактора, а саме збільшенням загальної поверхні теплообміну шляхом створення більш дрібних об'ємів реакційних камер всередині реактора. В основі запропонованої розробки лежить заміна однострубного на коаксіальний багатотрубний реактор, в якому не менше двох реакційних камер. Така конструкція реактора суттєво розширює температурні та барометричні експлуатаційні характеристики, дозволяє збільшити поверхню теплообміну і температуру всередині реактора, наблизивши її до зовнішньої температури поверхні стінки реактора при збереженні продуктивності.

Процес надкритичної ГТД органічних відходів здійснюється у замкнутому технологічному циклі з виведенням у зовнішнє середовище лише продуктів остаточного знешкодження. Залежно від призначення КУ об'єм реактора вибирається від 1 до 20 л. Час перебування реакційної суміші в ньому від 10 секунд до 1 хвилини, тому навіть при невеликому об'ємі реактора продуктивність КУ досить велика. Проведені дослідження свідчать про можливість подальшого розвитку технологій ГТД, як щодо забезпечення підвищених параметрів процесів, так і в частині розробки все більш надійних, продуктивних і безпечних в експлуатації типів реакторів. З'являється можливість здійснення процесів деструкції органічних речовин та відходів у реакторі при температурі більше 400°C та тисках 35–40 МПа. На рис.2 зображено загальний вигляд і поперечний розріз коаксіального (двотрубного) реактора для проведення хімічних реакцій при надкритичних параметрах водного середовища.



Рис. 2. Просторові схеми коаксіального (двотрубного) реактора:

а) загальний вигляд реактора; б) поперечний переріз реактора, де 4 - реактор; 25 - нижня кришка реактора; 26 - верхня кришка реактора; 27 і 28 - фланцеві з'єднання із кріпильними елементами; 29 - внутрішня труба реактора; 30 - зовнішня труба реактора; 31 - електричні нагрівальні елементи з термоізоляцією; 32 - теплоізолюючий кожух

КУ працює наступним чином. Попередньо підготовлені органічні відходи (суспензія, емульсія, розчин) з місткості 1 подаються насосом високого тиску 2 через підігрівач 3 в коаксіальний (двотрубний) реактор 4 із забезпеченням надкритичних параметрів води ($P > 22,1$ МПа і $T > 374^\circ\text{C}$). При таких умовах вода перетворюється на ідеальний розчинник. Окислювач (повітря, кисень, перекис водню або їх суміші) подається із місткості 9 через клапанний пристрій 10, компресором 11 в реактор 4. Клапана система реактора 4, завдяки використанню клапанних пристроїв 5, 6, 7, 8 виконана з можливістю забезпечення квазіпроточного режиму. Використання цифрової системи керування технологічними параметрами КУ за допомогою зворотних зв'язків, забезпечує її роботу у відповідності до заданих алгоритмів.

Коаксіальний (двотрубний) реактор 4 має дві реакційні камери для проведення хімічних реакцій при надкритичних параметрах водного середовища. Він містить щонайменше одну внутрішню трубу 29, зовнішню трубу 30, нижню кришку 25, верхню кришку 26, які з'єднані фланцями із кріпильними елементами 27 і 28. Кришки 27 і 28 оснащені технологічними патрубками, які з'єднані з відповідними клапанними пристроями 5, 6, 7, 8. Внутрішня поверхня кришок має еліпсоїдну форму, витягнуту вздовж поздовжньої осі реактора 4. Фланцеві з'єднання 27 і 28 із кріпильними елементами забезпечують герметичність і міцність зібраних конструкцій. На зовнішній трубі 30 встановлено електричні нагрівальні елементи 31, наприклад, індукційні з термоізоляцією. Кришки 25 і 26 реактора 4 мають теплоізолюючий кожух 32. Парогазова суміш, що утворюється в реакторі 4 подається в конденсатор 15, клапанний пристрій 16 і сепаратор 17. В сепараторі 17 проходить процес розділення вихідного продукту на нешкідливий газ, твердий осадок і воду з можливістю її повторного використання в технологічному циклі. Оскільки реакція надкритичного водного окислення органіки екзотермічна, то це дозволяє ефективно використовувати тепло самої реакції, як для підтримки температурного режиму в реакторі 4 для здійснення процесу надкритичного водного окислення, так і для компенсації енерговитрат на розігрів реагентів. Парогазова суміш, яка утворюється в реакторі 4 при надкритичній ГТД органічних відходів, може бути високоентальпійним робочим тілом для ефективної і екологічно чистої генерації теплової і електричної енергії.

При реалізації схеми когенерації (рис.1, а) на основі паросилової установки, яка працює за циклом Ранкіна парогазова суміш із реактора 4 проходить через пароперегрівач 12, випарник 13 і економайзер 14.

Робоча рідина, наприклад, вода, підготовлена, наприклад, за допомогою технології зворотного осмосу (технологія очищення води, при якій рідина проходить через спеціальну мембрану, позбавляючись від хімічних домішок і бактерій), подається із місткості 22 за допомогою живильного насоса 23 у пристрій для підігрівання води (економайзер) 14, випарник 13 і пароперегрівач 12. Пара високого тиску і температури

подається у турбіну (паровий двигун, наприклад, поршневий, роторний, роторно-лопатевий) 18, де відбувається перетворення потенційної енергії пари в кінетичну енергію потоку пари (швидкість потоку надзвукова). Кінетична енергія надзвукового потоку перетворюється у роботу турбіни (парового двигуна) 18, що затрачується на вироблення електричної енергії в генераторі 19. Після турбіни (парового двигуна) 18 пара спрямовується у конденсатор 20. Це звичайний теплообмінник, усередині труб якого проходить охолодна вода, ззовні - водяна пара, що конденсується. Цей конденсат (вода) надходить у живильний насос 21, де відбувається збільшення тиску до номінальної (проектної) величини, подається в економайзер 14 і цикл замикається.

При реалізації схеми когенераційної установки на основі теплового двигуна із зовнішнім підведенням тепла (рис. 1,б) парогазова суміш, що утворюється в реакторі 4 подається у теплообмінник 12. Двигун Стірлінга, який працює за замкненим термодинамічним циклом, виконує перетворення теплової енергії, отриманої від теплообмінника 12, на механічний рух електрогенератора 19 завдяки зміні температури робочого тіла, що циркулює в закритому об'ємі.

Парогазова суміш, яка пройшла через парогазову установку з блоком підготовки і подачі робочого тіла для теплового двигуна подається в конденсатор (пароводяний теплообмінник) 15 і/або 20 для отримання гарячої води і подачі її в систему опалення і/або термоізолювану місткість з гарячою водою для подачі споживачам.

В запропонованій КУ використовується інноваційна технологія надкритичної ГТД органічних відходів., що значно розширює її функціональні можливості. Збільшення ККД досягається оснащенням КУ цифровою системою керування, кількома реакторами, що працюють паралельно, причому модулі підготовки і подачі органічних відходів, реактор із клапанними пристроями, тепловий двигун, теплообмінники, насоси, місткості із окиснювачем і водою з'єднують термоізолюваними трубопроводами. Її можна виготовляти з використанням відомих у промисловості матеріалів, устаткування та інструментів. Природно, що при виборі конкретних форм практичного здійснення КУ можливі доповнення і/або уточнення з використанням звичайних знань фахівців.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розглянуті питання створення ефективних і екологічно чистих енергосистем на основі технології когенерації. Пропонується КУ, яка може використовуватися для вирішення енергоефективної та екологічно безпечної утилізації органічних відходів. Вона має значний ринковий потенціал і може успішно використовуватися для вирішення задач щодо створення автономного, стаціонарного або мобільного енергетичного комплексу для забезпечення електричною і тепловою енергією промислових та житлових об'єктів. Роботу планується продовжити у напрямку оптимізаційного синтезу окремих модулів КУ за різними критеріями, що важливо для її практичного використання.

Література

1. Косіюк М.М. Автономна високоефективна когенераційна установка / М.М. Косіюк, А.М. Косіюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 2. – С. 84–87.
2. Патент 143842 Україна, МПК F01B 23/10, F01K 3/20, F02G 1/043. Когенераційна установка / Косіюк М.М., Косіюк А.М. – № u202002008 ; заявл. 23.03.2020 ; опубл. 10.08.2020, Бюл. № 15.
3. Yesodharan S. Supercritical water oxidation: An environmentally safe method for the disposal of organic wastes. *Current Science*. 2002. Vol. 82. P. 1112–1122.
4. Toor S.S., Rosendahl L., Rudolf A. Hydrothermal liquefaction of biomass: a review of subcritical water technologies. *Energy*. 2011. T. 36, № 5. P. 2328–2342.
5. Mazalov Y., Pustovgar A., Grigorev V., Vedenin A., Adamtsevich A., Technology for Hydrothermal Destruction of Organic Fuel Materials. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. T. 752. P. 873–877.
6. Queiroz J. P. S. et al. Supercritical water oxidation with hydrothermal flame as internal heat source: Efficient and clean energy production from waste. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2015. T. 96. P. 103–113.
7. Cui C. et al. Review on an advanced combustion technology: Supercritical hydrothermal combustion. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. № 5. P. 1645.

References

1. Kosiuk M.M. Avtonomna vysokoeffektivna koheneratsiina ustanovka / M.M. Kosiuk, A.M. Kosiuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2020. – № 2. – S. 84–87.
2. Patent 143842 Ukraine, MPK F01B 23/10, F01K 3/20, F02G 1/043. Koheneratsiina ustanovka / Kosiuk M.M., Kosiuk A.M. – № u202002008 ; zaiavl. 23.03.2020 ; opubl. 10.08.2020, Biul. № 15.
3. Yesodharan S. Supercritical water oxidation: An environmentally safe method for the disposal of organic wastes. *Current Science*. 2002. Vol. 82. P. 1112–1122.
4. Toor S.S., Rosendahl L., Rudolf A. Hydrothermal liquefaction of biomass: a review of subcritical water technologies. *Energy*. 2011. T. 36, № 5. P. 2328–2342.
5. Mazalov Y., Pustovgar A., Grigorev V., Vedenin A., Adamtsevich A., Technology for Hydrothermal Destruction of Organic Fuel Materials. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. T. 752. P. 873–877.
6. Queiroz J. P. S. et al. Supercritical water oxidation with hydrothermal flame as internal heat source: Efficient and clean energy production from waste. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2015. T. 96. P. 103–113.
7. Cui C. et al. Review on an advanced combustion technology: Supercritical hydrothermal combustion. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. № 5. P. 1645.