

Крот О.П.

Харківський національний університет будівництва та архітектури

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СМІТТЄСПАЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК ЗА РЕКОМЕНДАЦІЯМИ ДИРЕКТИВИ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ

Утилізація твердих побутових відходів є проблемою для більшості українських муніципалітетів. Відповідно до сучасних світових тенденцій поводження з відходами, спалювання відходів з отриманням енергії дозволяє знизити вплив на навколишнє середовище. У статті розглядається можливість проектування сміттєспалювальних підприємств в Україні за вимогами директиви 2008/98/ЄС. Наводиться формула розрахунку енергетичної ефективності для сміттєспалювальних установок, так звана «формула R1», яка втілює термін «відходи в енергію». Основними параметрами, що збільшують значення R1, є виробництво теплової та електричної енергії від спалювання відходів.

Ключові слова: побутові відходи, термічне знешкодження, енергоефективність, теплотворна здатність, енергія з відходів.

Постановка проблеми. Утилізація твердих побутових відходів (далі – ТПВ) є проблемою для більшості українських міст. Основна маса ТПВ без попереднього оброблення (сортування) викидається на звалища, що спричиняє негативні екологічні наслідки. Згідно зі ст. 32 «Про заходи щодо обмеження та запобігання негативному впливу відходів» Закону України «Про відходи», забороняється з 1 січня 2018 р. захоронення на полігонах необроблених побутових відходів. Термічне оброблення ТПВ із рекуперацією енергії є альтернативним методом.

Спалювання відходів, зокрема, відновлення тепла, застосовується в більш ніж 450 енергетичних об'єктах по всій Європі і в багатьох країнах світу загалом. За даними Євростату, 2014 р. середня кількість відходів на 1 людину становила 465 кг. 98% із них були оброблені в різний спосіб, серед них: 28% поховані, 28% перероблені, 27% спалені, а 15% компостовані (середнє значення по Європейському Союзу (далі – ЄС)).

Під час управління ТПВ необхідно враховувати такі аспекти: будь-яка урбанізована територія генерує багато відходів, наявні методи утилізації ТПВ мають недоліки соціального, економічного й екологічного планів. Склад відходів, що утворюються, надзвичайно нестабільний через сезонні коливання, спосіб життя населення, демографічну структуру, географічний стан і законодавчі рішення. Теплотворну здатність ТПВ вивчали багато авторів [1; 2]. Було встановлено, що теплотворна здатність зале-

жить від морфологічного складу, вологості і зольності відходів і коливається в широкому діапазоні від 4 до 15 МДж/кг.

Технології, які використовують потоки відходів для виробництва енергії, визначаються як «енергія з відходів» (“energy from waste”). Але «відходи в енергію» “waste-to-energy” – це термін, який стосується виробництва енергії за допомогою термічного оброблення безпечних відходів. Хоча нові термічні процеси, як-от газифікація і піроліз, стають все більш популярними, термін «відходи в енергію» в основному стосується спалювання твердих побутових відходів. Усі Директиви про відходи, ухвалені Європейською комісією, поділяють стратегії управління відходами на операції з відновлення й операції з видалення (ліквідації). У цьому контексті важливо зазначити, що «відновлення» означає будь-яку діяльність, основним результатом якої є технологічне оброблення відходів, що включає вилучення та відновлення цінних компонентів відходів, з поверненням їх для повторного використання або отримання енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До оцінки ефективності роботи сміттєспалювальних заводів можна підходити по-різному. Наприклад, із застосуванням багатокритеріального аналізу ефективність установок визначається декількома чинниками: продуктивністю, трудомісткістю, безпекою. Є методики, які враховують витрату умовного палива – це актуально для теплогенеруючих установок, що працюють на традиційному паливі.

Також ефективність спалювання відходів можна оцінювати за повнотою згоряння, аналізуючи гази, що відходять.

В ЄС ефективність спалювання відходів оцінюється згідно з Директивою про відходи [3], яка набрала чинності 2008 р. і позиціонує сміттєспалювальні заводи муніципальних відходів як операцію з відновлення, за умови, що вони відповідають визначеним критеріям. Метою цього є сприяння використанню відходів для виробництва енергії в енергоефективних сміттєспалювальних установках і заохочування інновацій у термічне знешкодження відходів. Невичерпний перелік операцій з відновлення, представлених у Додатку II [3], основним ядром яких є формула R1. Вона визначає сміттєспалювальну установку як операцію з відновлення енергії – «відходи використовувати передусім як паливо або інші засоби для вироблення енергії». Пояснюється, що сюди відносять установки для спалювання, призначені для перероблення твердих побутових відходів, тільки якщо їхня ефективність використання енергії дорівнює або перевищує: 0,60 – для установок, що експлуатуються і відповідають вимогам Директиви [3], а отже, отримали дозвіл до 1 січня 2009 р., та 0,65 – для установок, дозволених після 31 грудня 2008 р.

Незважаючи на велике значення формули R1, аналіз наукових досліджень у попередньому огляді показав відсутність інформації про вплив різних параметрів на значення R1. Була вивчена обмежена роль таких чинників, як клімат, енергетичний вміст відходів, морфологічний склад відходів, границі системи та налаштування установки.

Метою дослідження [4] було виявлення та кількісне визначення параметрів і чинників, що впливають на ефективність формули R1 для установок «енергія з відходів», шляхом дослідження всіх невизначеностей у розрахунках. Ключовою частиною проекту було визначення того, наскільки нестабільність параметрів, що містить формула R1, впливає на кінцевий результат. Встановлено, що енергоефективність більш чутлива до зміни нижчої теплоти згоряння відходів і до валової електричної ефективності.

Другим аспектом проекту [4] було дослідження взаємозв'язку між електричною ефективністю та тепловою ефективністю. Результати показують, що електричний та тепловий коефіцієнти корисної дії (далі – ККД) є зворотно пропорційними.

Визначено дві взаємозалежності між тепловою ефективністю й електричним ККД: одним лінійним і одним поліномом. Формула R1 має наслідки для проектування й експлуатації установок, що виробляють енергію з відходів. Занепокоєння

викликають також чинники, які на даний момент не враховуються, як-от клімат у районі розташування проектного об'єкта, розташування заводу та точні межі системи, що використовуються для розрахунку значень формули R1.

У статті [5] експериментально проаналізовано ефективність італійської установки «енергія з відходів» невеликого розміру, що виробляє тільки електричну енергію. Сміттєспалювальний завод працює в центральній Італії із 2000 р. і обробляє в середньому майже 42 000 т залишкових відходів на рік. Відходи із середньою швидкістю приблизно 130 т/добу завантажуються на сітку, розташовану на дні адіабатичної камери згоряння. Енергоефективність наявних відходів для енергетичної установки була досліджена на відповідність Директиві [3]. На момент розрахунку енергоефективності сміттєспалювальний завод виробляв тільки електричну енергію від спалювання відходів паровою турбіною і результат, за формулою R1, був приблизно 0,44.

Новий європейський критерій ефективності R1 приведе до розроблення та впровадження оптимізованих процесів – систем із підвищеною енергоефективністю, що, у свою чергу, вплине на утворення парникових газів із різних процесів поводження з відходами в Європі. Перспективними технологіями є: збільшення параметрів пару, зниження споживання енергії на сміттєспалювальному заводі і спільне використання тепла й електроенергії. У роботі [6] наведено критичний аналіз впливу ефективності рекуперації енергії на баланс парникових газів на основі даних наявних установок. Наприклад, в Австрії немає особливого критерію ефективності, але є загальна нормативна потреба в комбінованому виробленні тепла й електроенергії, яка включає виробництво тепла й електроенергії на заводах з отримання енергії з відходів. В Японії майже 74% із 48,1 млн. т муніципальних твердих відходів спалюються на 1 269 теплових заводах. 2009 р. Міністерством навколишнього середовища Японії в країні введений «План сприяння формуванню розуміння суспільством важливості рециркуляції відходів у фінансовому році». У цьому плані описується схема субсидування для установок, які переробляють відходи в енергію: 50% інвестицій покривається урядом, якщо будуть досягнуті певні межі енергоефективності.

У роботі [7] розроблена трапецієподібна радарна діаграма, яка забезпечує загальне рішення для всіх установок, що перетворюють відходи на енергію. Особливу увагу автори приділяють процесам газифікації й піролізу. Але ці технології більш підходять

для таких відходів, як пластмаси, резина тощо. Піроліз не рекомендується для загальних муніципальних відходів. Згідно з поясненнями до Директиви [8], сміттєспалювальні установки, призначені для спалювання муніципальних відходів, являють собою установки для спалювання відходів, які мають дозвіл і технічно розроблені так, щоб сприяти спалюванню змішаних твердих побутових відходів.

Дослідження [9] присвячено питанням управління відходами й енергоресурсами на Тайвані. Зокрема, розглядається спалення ТПВ як життєздатна технологія для виробництва теплової та електричної енергії. У Тайвані працюють 24 підприємства з перероблення відходів в енергію – це найвища густина сміттєспалювань ТПО (кількість сміттєспалювальних заводів на земельну ділянку) у світі. Загальний проектний потенціал потужності цих 24 заводів становить 558,5 МВт. У разі повної реалізації потужностей підприємств це може принести дохід у розмірі понад 167 мільйонів доларів Сполучених Штатів Америки (далі – США) на рік. ТПО Тайваню має високу теплотворну здатність (1,873 ккал/кг) та низький вміст води (53,4%), що робить його цінним джерелом відновлюваної енергії. Приблизно 6,5 мільйонів тонн на рік ТПВ у даний час спалюються для відновлення енергії та скорочення відходів. Автори дослідження застосовують формулу R1 до сміттєспалювальних заводів Тайваню і вважають, що конструкція пристрою з виробництва енергії, потужність та низька теплотворна здатність є важливими параметрами проектування об'єктів спалювання.

Постановка завдання. Мета статті – дослідження можливості використання формули енергоефективності для проектування нових сміттєпереробних заводів в Україні.

Виклад основного матеріалу. Розглянуто основні складники формули для розрахунку енергоефективності. Відповідно до Додатка II Рамкової директиви про відходи (European Commission. (2008). Directive 2008/98 / EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Brussels, Belgium), для розрахунку енергоефективності пропонується використовувати формулу R1:

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97(E_w + E_f)}, \quad (1)$$

де E_p – це кількість енергії, виробленої сміттєспалювальною установкою щорічно у вигляді електроенергії і тепла, в ГДж/рік або МВт*годину/рік.

Для обчислення E_p використовуються два чинники еквівалентності, як визначено в документі

(Додаток II, WFD 2008/98 / EC). Кількість виробленої електроенергії E_{el} множиться на 2,6, тоді як кількість тепла – на 1,1 Eth. Чинник 2,6 для електрики заснований на середньому європейському коефіцієнті вугільних установок із 38%, що означає потребу в енергії 2,6 кВт*години для виробництва 1 кВт*години електроенергії. Чинник 1,1 для генерованого тепла заснований на середньому європейському коефіцієнті теплових установок 91%. Отже, E_p розраховується так:

$$E_p = 2,6 \cdot E_{el} + 1,1 E_{th}, \quad (2)$$

де E_f – це кількість енергії, яка щорічно імпортується в систему. Це ефективна енергія від спалювання відходів, а також від використання звичайних видів палива для розігріву, у ГДж/рік або МВт*годину/рік. Для розрахунку E_f (3) має бути обчислена чиста теплотворна здатність палива Q_i у кДж/кг] і розрахована кількість палива m , яке використовується для запуску і зупинки процесу спалювання, зокрема й паливо для підтримки необхідних температур із використанням допоміжних пальників:

$$E_f = \sum_{i=1}^n m_{f,i} \cdot Q_i, \quad (3)$$

де E_w – це річна енергія, що міститься в оброблених відходах, у ГДж/рік або МВт*годину/рік, розрахована з використанням чистої теплотворної здатності ТПВ Q_w та щорічного надходження відходів M_w :

$$E_w = M_w \cdot Q_w, \quad (4)$$

де E_i – це щорічно імпортована енергія, крім E_w і E_f , у ГДж/рік або МВт*годину/рік, яка складається з постачання електроенергії, пари або гарячої (охолодженої води) тощо, які необхідні для ефективної роботи установки.

0,97 – це чинник, який кількісно визначає втрати енергії внаслідок випромінювання і зольності.

Теплотворна здатність ТПВ Q_w в основному залежить від морфологічного складу, вологості та зольності відходів. Усереднений склад муніципальних відходів представлений у таблиці 1.

Морфологічний склад ТПВ може змінюватися залежно від сезону, від кліматичних характеристик, від рівня життя населення та від суворості законодавства. ТПВ складаються з десятків різноманітних речовин, які, у загальному вигляді, можна розподілити на чотири основних категорії, а саме: папір (25%), пластмаса (19%), харчові відходи (27%), садові відходи (29%). Останнім часом вміст пластику та гуми істотно збільшився, а кількість харчових відходів знизилась. Результати елементного аналізу ТПВ показані в роботі [10].

Відходи зазвичай мають високий вміст вуглецю і помірний вміст водню, що вказує на хороший енергетичний потенціал. Вміст хлору є нижчим 1% для всіх видів відходів.

Таблиця 1

Усереднений склад муніципальних відходів

Тверді побутові відходи	Вміст, %
Папір	6,8...9,4
Картон	4,4...7,6
Великогабаритний картон	2,3...5,5
Харчові відходи	12,5...16,9
Садові відходи	9,4...11,5
Пластик	13,8...18,3
Текстиль	8,5...9,1
Шкіра	0,3...2,3
Метал	0,7...2,9
Скло	0,2...2,4
Гума	8,4...14,1
Негорючі відходи (каміння)	5,2...6,3
Інші горючі	11,4...12,7
Вологість відходів	32...60
Зольність	12...50

Якщо проводити сортування відходів, то їхня теплотворна здатність збільшується, оскільки відсортовуються такі речовини, як скло, метал, які знижують ефективність процесу спалювання. Щоб використовувати ТПВ як енергоносії, необхідно дослідження показників вологості та зольності.

Теплотворна здатність ТПВ у табл. 2. наведена з розрахунку на сухий залишок для випадку, коли волога конденсується в газоподібних речовинах – так звана вища теплотворна здатність. Кількість тепла, що виділяється з вологих компонентів відходів, розраховується множенням відповідного значення для сухих компонентів на значення вмісту в них вологи.

Таблиця 2

Питома теплота згоряння окремих компонентів муніципальних відходів

Тверді побутові відходи	МДж/кг
Папір	12,1...19,7
Картон	17,9
Великогабаритний картон	17,3
Харчові відходи	19,2
Садові відходи	19,3
Пластик	21,8...43,2
Текстиль	16,6...18,47
Шкіра	18,2...20,3
Метал	1,35
Скло	0,16
Гума	19,1...25,6

Для порівняння, теплотворна здатність торфу – 5,5 МДж/кг, кам'яного вугілля – 26,7 МДж/кг.

Наведемо приклад розрахунку за формулою R1 установки, яка містить: системи прийому, транспортування і завантаження сміття; подачі палива; подачі лужного розчину; обертову піч; систему газовідвідного тракту; систему видалення, транспортування шлаку й уловленого пилу; теплоутилізаційну станцію; компресорну станцію; водопідготовчу установку; систему контролю і керування. Установка є традиційною, наприклад, для Харківської області: продуктивністю 1 000 кг/годину, за умови виробництва електроенергії 25 кВт/год., середня теплотворна здатність відходів – 6 476,832 кДж/кг за вологості 60%, використання додаткового дизельного палива – 20 кг/год., питома витрата електроенергії – 70 кВт/год.

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97(E_w + E_f)} = \frac{(43536 \cdot 1,1 + 7884 \cdot 2,6) - (7533 + 22075)}{0,97(57000 + 7533)} = 0,62.$$

Висновки. Під час роботи проаналізовані складники формули R1. Вираз має деякі невідповідності, які розглянуті декількома дослідниками з моменту її введення. По-перше, формула не є термодинамічно коректною. У розрахунку за формулою R1 враховується ефективність використання енергії спалювання ТПВ, а не чиста вироблена енергія. Показник «Вироблена енергія» відносять до валового виробництва енергії, а не до виробництва чистої енергії, а з іншого боку, той факт, що електрика або тепло надходять в мережу, не обов'язково означає, що вони будуть використовуватися, з огляду на віддаленість сміттєпереробних підприємств. У визначенні членів E_f та E_w є кілька двозначностей. E_p розраховується з використанням енергії у вигляді електрики, помноженої на 2,6, і тепла, виробленого для комерційного використання, помноженого на 1,1. Але коефіцієнти 2,6 і 1,1 не мають термодинамічної сенсу, як і коефіцієнт 0,97. Для досягнення статусу R1 необхідне значне виробництво тепла. Під час виробництва теплової та електричної енергії (основні параметри, що збільшують значення R1), використовується обладнання, в якому тепло від газів передається через стінку. Відомо, що теплопередача через стінку малоефективна і тому гази після теплоутилізаційного обладнання мають високу температуру. Тому у формулі енергоефективності доцільно було б враховувати коефіцієнт використання енергії спалювання відходів на промислові технології, наприклад, у виробництві будівельних матеріалів. Крім того, великі підприємства мають більший рейтинг R1 зі спалювання сміття (потужністю більше 100 000 т/рік).

Список літератури:

1. Kong W. Implementation of incineration for efficient waste reduction. International Conference on Advances in Environment Research. 2015. Vol. 87. P. 77–80. DOI: 10.7763/IPCBE. 2015. V. 87. P. 14.
2. Young G. Municipal solid waste to energy conversion processes: Economic, technical, and renewable comparisons. New Jersey, United States: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 396 p.
3. Waste Framework Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste. Official Journal of the European Union, November, 22, 2008. P. L312/3–30.
4. Chatzopoulou M., Cheeseman C., James P., Velis C. Critical evaluation of the R1 formula for energy from waste plants classification: is the target hit? Conference: 4th International Conference, Hellenic Solid Waste Management Association (HSWMA), At Athens, Greece. 2012. Vol. 1. P. 1–14. DOI: 10.13140/RG.2.1.4235.4649.
5. Francesco D., Stefano Contini, Gianni Bidini, Antonio Boncompagni, Marzio Lasagni, Federico Sisani. Energetic efficiency of an existing waste to energy power plant. Energy Procedia. 2016. № 101. P. 1175–1182. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.11.159.
6. Gohlke O. Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance. Waste Management & Research. 2009. № 27. P. 894–906. DOI: 10.1177/0734242X09349857.
7. Vakalis S., Moustakas K., Loizidou M., Assessing the 3T method as a replacement to R1 formula for measuring the efficiency of waste-to-energy plants (Greece). 5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management 21–24 June 2017 Athens, Greece. URL: <http://athens2017.uest.gr/>.
8. Guidelines on the interpretation of the R1 energy efficiency formula for incineration facilities dedicated to the processing of Municipal Solid Waste according to Annex II of Directive 2008/98/EC on waste (not legally binding version). Official Journal of the European Union. 2011. 33 p.
9. Ying-Chu Chen, Chung-Ting. Wang Municipal solid waste (MSW) incineration's potential contribution to electricity production and economic revenue in Taiwan. Journal of Taiwan Energy. 2017. Vol. 4. № 1. P. 93–106.
10. Lei Zhao, Apostolos Giannis, Wan-Yee Lam, Sheng-Xuan Lin, Ke Yin, Guo-An Yuan, Jing-Yuan Wang. Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value. Sustainable Environment Research. 2016. Vol. 26. Is.1. P. 51–54. DOI: 10.1016/j.serj.2015.09.003.

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ МУСОРОСЖИГАЮЩИХ УСТАНОВОК
ПО РЕКОМЕНДАЦИЯМ ДИРЕКТИВЫ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА**

Утилизация твердых бытовых отходов является проблемой для большинства украинских муниципалитетов. Согласно современным мировым тенденциям обращения с отходами, сжигание отходов с получением энергии позволяет снизить вредное воздействие на окружающую среду. В статье рассматривается возможность проектирования мусоросжигательных заводов в Украине в соответствии с директивой 2008/98/EC. Приводится формула расчета энергетической эффективности для мусоросжигательных установок, так называемая «формула R1», реализующая термин «отходы в энергию». Основными параметрами, увеличивающими значение R1, является производство тепловой и электрической энергии после сжигания отходов.

Ключевые слова: бытовые отходы, термическое уничтожение, энергетическая эффективность, теплотворная способность, энергия из отходов.

**ENERGY EFFICIENCY OF WASTE INCINERATION ON THE RECOMMENDATION
OF THE EUROPEAN UNION DIRECTIVE**

Utilization of solid household waste is a problem for most Ukrainian municipalities. According to modern world trends of waste management, incineration of waste with energy generation allows to reduce the harmful impact on the environment. The possibility of designing incineration plants in Ukraine is considered in accordance with Directive 2008/98/EC. A formula is given for calculating the energy efficiency for incineration plants, the so-called “formula R1”, which realizes the term “waste into energy”. The main parameters that increase the value of R1, is the production of thermal and electrical energy after the incineration of waste.

Key words: household waste, incineration, energy efficiency, heating value, energy from waste.