**Олабін В.М., канд. техн. наук, Трухан С.П.,
Максимук О.Б., канд. техн. наук, Нікітіна І.В.**
Інститут газу НАН України, Київ
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: otaksymuk@gmail.com

Утилізація твердих побутових відходів двостадійним спалюванням на рухомій подині та у барботованому розплаві

Проаналізовано стан проблеми утилізації твердих побутових відходів, які знаходяться на звалищах. Запропоновано комбінований спосіб двостадійного спалювання твердих побутових відходів у період опалювального сезону. Наведено результати розрахунків теплових балансів процесів випаровування, спалювання на крокуючій подині та у барботованому розплаві, нагріву повітря у рекуператорі, нагріву води у контактному теплообміннику, котлі-утилізаторі та у системі гарячого водопостачання. Показано, що ліквідація джерела забруднень у вигляді твердих побутових відходів при двостадійному способі спалювання: на крокуючій подині та потім у барботованому розплаві — дає можливість позбутися вторинних твердих відходів, які утворюються при традиційному спалюванні. У результаті плавки у барботованому розплаві утворюються гази, які містять продукти згоряння й розкладу тверді побутові відходи та шлак, що складається із силікатів та оксидів металів. *Бібл. 10, рис.3, табл. 1.*

Ключові слова: тверді побутові відходи, завантажувальний бункер, крокуюча подина, барботажна піч, рекуператор, котел-утилізатор, контактний теплообмінник, гаряче водопостачання.

Постановка проблеми

В Україні щорічно утворюється 14 млн т побутових відходів, ще 434 млн т генерують підприємства. З побутових відходів сортується тільки 5,5 %. Більш 1 % спалюють на Київському заводі «Енергія». У Києві утворюється близько 1,2 млн т/рік побутових відходів [1].

Тверді побутові відходи (ТПВ) у певній мірі можна віднести до палива та, відповідно, полігони ТПВ (звалища відходів) — до паливних ресурсів.

На даний час відомо більш 20 методів знешкодження та утилізації відходів [2–4]. У світовій практиці знайшли застосування переважно два методи переробки твердих відходів: термічна переробка (спалювання); біотермічне аеробне компостування (з отриманням добрив або біопалива) [5]. Ці методи застосовують, як правило, у поєднанні з процесами селективного відбору токсичних компонентів та механічного сортування відходів з метою використання тих чи інших цінних компонентів та видаленням токсичних речовин.

Більшість способів для утилізації та переробки свіжих ТПВ не можуть бути застосовані для переробки ТПВ, які знаходяться на звалищах. По суті єдиний спосіб переробки ТПВ зі звалищ — це спалювання на рухомій подині чи решітці. На існуючих сміттєспалювальних заводах у печах з колосниковими решітками при відносно низьких температурах процесу (600–900 °C) без додаткового введення палива згоряє приблизно 70–85 % складових ТПВ (незгорілі тверді залишки вимагають спеціального знешкодження або захоронення, що є великим недоліком цієї технології). Уникнути перелічених недоліків дає можливість комбінований метод двостадійного спалювання ТПВ на рухомій подині та у барботованому розплаві. При використанні гарячого дуття та частковій сушці ТПВ можна забезпечити автономність процесу, незважаючи на високу вологість сировини.

Конкурентоздатною по відношенню до прямого спалювання може бути газифікація ТПВ при застосуванні її при безпосередньому використанні генераторного газу для виробництва елек-

тричної енергії, у когенераційних технологіях, при сумісному спалюванні генераторного та природного газу при частковому заміщенні останнього, а також при частковому використанні теплових втрат процесу, наприклад, при використанні охолоджуючої води у котельних установках для побутового застосування [6].

Мета роботи

Розробка схеми технологічного комплексу для реалізації комбінованого методу двостадійного спалювання ТПВ у період опалювального сезону. Розрахунок теплових балансів процесів випаровування, спалювання ТПВ на крокуючій подині та у барботажній печі, а також процесів нагріву повітря у рекуператорі й води для гарячого водопостачання та системи обігріву житлового фонду.

Результати виконаної роботи

Розроблено технологічний комплекс для реалізації способу двостадійного спалювання ТПВ: на крокуючій подині, а потім спалювання горючого залишку та плавлення мінеральної частини у барботованому розплаві, принципова схема якого представлена на рис.1.

Використання способу двостадійного спалювання ТПВ дає можливість позбутися вторинних твердих відходів, які утворюються при традиційному спалюванні. У розплаві шлаку, який утворюється у барботажній зоні з мінеральної частини ТПВ, є також оксиди важких металів. Враховуючи те, що продукти спалювання ТПВ містять значну кількість вологи (понад 50 %), у схемі передбачено встановити після водогрійного котла конденсаційний контактний водонагрівач та проміжний водоводяний теплообмінник з метою утилізації прихованої теплоти випаровування. У водонагрівачі та проміжному водоводяному теплообміннику нагрівається підживлювальна вода системи гарячого водопостачання. Конденсація пари з димових газів підвищує ефективність способу.

Для підтвердження ефективності та комерційної привабливості запропонованого способу двостадійного спалювання ТПВ у роботі представлені розрахунки конкретної технологічної установки продуктивністю 60 тис. т/рік.

Рис.1. Схема технологічного комплексу комбінованого методу двостадійного спалювання ТПВ: ВВТ — водоводяний теплообмінник; КТ — контактний теплообмінник; ГО — газоочистка; P1, P2 — рекуператори; КУ — котел-утилізатор; ВБ — витратний барабан; ССП — система спалювання та плавлення.

Fig. 1. Scheme of the technological complex of the combined method of two-stage combustion of solid waste: ВВТ — water-to-water heat exchanger; КТ — contact heat exchanger; ГО — gas cleaning; P1, P2 — recuperators; КУ — waste heat boiler; ВБ — consumable drum; ССП — combustion and melting system.

Розрахунки проводилися для середнього хімічного складу ТПВ, прийнятого за даними Академії комунального господарства ім. К.Д.Памфілова [7] (таблиця).

Для визначення нижньої теплотворної спроможності ТПВ використовувалася формула Менделєєва [8, 9]:

$$Q_{н}^p = 81 C + 246 H - 26 (O - S) - 6 W,$$

де C, H, O, S, W — ваговий відсотковий вміст у ТПВ відповідно вуглецю, водню, кисню, сірки, вологи.

Середній хімічний склад ТПВ на різних стадіях термічної переробки

Table 1. The average chemical composition of solid waste at different stages of thermal processing

Компоненти ТПВ	Вихідний склад ТПВ, кг/год (%)	Склад ТПВ після упарювання води, кг/год (%)			Залишок після випарювання та згоряння 80 % горючої частини
		1500 кг води	2000 кг води	повного випарювання	
H ₂ O	7500 (50)	6000 (44,4)	5500 (42,3)	0 (0)	0 (0)
Метали	34,5 (0,23)	34,5 (0,255)	34,5 (0,26)	34,5 (0,46)	34,5 (1,22)
Fe	180 (1,2)	180 (1,33)	180 (1,38)	180 (2,4)	180 (6,36)
S	30 (0,2)	30 (0,220)	30 (0,23)	30 (0,4)	– (–)
SiO ₂	490,5 (3,27)	490,5 (3,7)	490,5 (3,77)	490,5 (6,54)	490,5 (17,33)
CaO	415,5 (2,77)	415,5 (3,08)	415,5 (3,20)	415,5 (5,54)	415,5 (13,62)
Al ₂ O ₃	385,5 (2,57)	385,5 (2,85)	385,5 (2,97)	385,5 (5,14)	385,5 (14,95)
Mg	187,5 (1,25)	187,5 (1,40)	187,5 (1,44)	187,5 (2,5)	187,5 (6,62)
O ₂	2580 (17,2)	2580 (19,11)	2580 (19,85)	2580 (34,2)	516 (18,22)
N ₂	90 (0,6)	90 (0,67)	90 (0,69)	90 (1,2)	– (–)
C	2880 (19,2)	2880 (21,3)	2880 (22,12)	2880 (38,4)	576 (20,35)
H ₂	226,5 (1,51)	226,5 (1,68)	226,5 (1,74)	226,5 (3,02)	45,3 (1,61)
Разом	15000	13500	13000	7500	2831

Розрахована теплотворна спроможність ТПВ для вихідного складу (див. таблицю, колонка 3), для частково висушеного ТПВ (колонка 5), для повністю випареної води (колонка 9) та для залишку після випарювання та згоряння 80 % горючих (колонка 11) дорівнює відповідно 1184,66; 1381,04; 2974,52 та 1570,69 ккал/кг.

Графічно результати розрахунків представлені на рис.2, 3.

Повний зміст розрахунків теплових балансів випарювання, спалювання на крокуючій подині, барботажної зони, рекуператора, котла-утилізатора, контактного теплообмінника та тепловий баланс нагріву води у системі гарячого

Рис.2. Залежність вологості ТПВ від маси випареної води (залишкової маси ТПВ).

Fig. 2. The dependence of the humidity of solid waste on the mass of evaporated water (residual mass of solid waste).

водопостачання наведені у Звіті за темою № ПІ-9-16 «Розроблення наукових та технологічних засад підвищення енергетичної ефективності термообробки дисперсних матеріалів» Інституту газу НАН України (Київ, 2018, с. 82–102).

Рис.3. Залежність нижчої теплотворної спроможності ТПВ від вологості (для хімічного складу ТПВ, наведеної у таблиці).

Fig. 3. Dependence of the lower calorific value of MSW on moisture (for the chemical composition of MSW, shown in Table 1).

Теплоємність газів визначалася за довідниковими даними [9, 10].

Об'єм завантажувального бункеру складає 160 м^3 (визначено з розрахунку двогодинного запасу вихідного ТПВ). У бункер завантажується 15000 кг/год ТПВ, склад яких наведено у колонці 2 таблиці, у тому числі вологи — 7500 кг/год .

У нижній частині бункера розміщено сопла для подачі гарячого повітря, нагрітого до 550°C , для часткового випарювання вологи з відходів.

Задана кількість випарюваної у бункері вологи — 1500 кг/год . Температура вологого повітря на виході з бункера $T_{\text{вн}} = 120^\circ\text{C}$.

Кількість ТПВ, що завантажують на крокуючу подину, — 13500 кг/год .

Склад ТПВ: волога — 6000 кг/год ($44,4\%$); мінеральна частина (оксиди) — 1650 кг/год ($12,22\%$); горюча складова — 3136 кг/год ($23,23\%$); органічні солі — 2714 кг/год ($20,11\%$).

Хімічний склад ТПВ, які надходять на рухому подину після часткового випарювання, наведено у колонках 4 та 5 таблиці. Із зони крокуючої подини тепло відводиться:

- у рекуператор з продуктами горіння, продуктами деструкції мінеральних солей та паром;

- через зовнішні стінки зони крокуючої подини;

- у барботажну зону.

Димові гази, які утворюються при окисленні горючих та деструкції мінеральних солей, містять азот, пару, вуглецевий газ та діоксид сірки. Кількість газів визначалася за вмістом у ТПВ кисню, водню, вуглецю та сірки.

Після спалювання горючої частини ТПВ на крокуючій подині у барботажній зоні спалюють незгорілий залишок, що надходить з крокуючої подини.

Для забезпечення повного вигорання горючої частини ТПВ та плавлення мінеральної складової визначено розміри барботажної зони. Об'єм барботажної зони $V_{6.3.} = 16 \text{ м}^3$, площа водоохолоджуваних стін $F_{6.3.} = 42 \text{ м}^2$.

Об'єм барботованого розплаву у зоні — $3,77 \text{ м}^3$. У барботажній зоні тепло витрачається на плавлення мінеральної частини ТПВ, на нагрів залишку ТПВ, відводиться через покриті гарнісажем стіни та відводиться з димовими газами у рекуператор. У рекуператор надходить суміш газів, які утворилися на крокуючій подині та у

барботажній зоні. Всього у рекуператор надходить $33733,96 \text{ м}^3/\text{год}$ димових газів з температурою 1221°C , які вносять $16,31 \text{ Гкал/год}$ тепла та $36901,78 \text{ м}^3/\text{год}$ повітря з температурою 20°C , яке вносить $0,23 \text{ Гкал/год}$ тепла. Тепло димових газів витрачається на нагрів повітря до 550°C . Кількість тепла, яке використовується для попередньої сушки ТПВ у витратному барабані, для спалювання горючої частини ТПВ на крокуючій подині та для спалювання незгорілого домішку у барботованому розплаві становить $6,55 \text{ Гкал/год}$. Тепловитрати у навколишнє середовище складають $0,63 \text{ Гкал/год}$.

Після рекуператора димові гази проходять через теплообмінник догріву води, надходять до котла-утилізатора (КУ), а з нього до контактного теплообмінника (КТ).

Для розрахунку теплових балансів зазначених теплообмінників визначені найбільш доцільні режими їх роботи. Тепло димових газів кількістю $9,14 \text{ Гкал/год}$ та температурою 785°C витрачається для нагріву води для системи опалення житлового фонду та води для систем гарячого водопостачання. У системі гарячого водопостачання отримано $8,48 \text{ Гкал/год}$, у системі опалення — $4,42 \text{ Гкал/год}$ теплової енергії. Разом — $12,9 \text{ Гкал/год}$ теплової енергії.

Після контактного теплообмінника димові гази надходять у систему газоочистки, з неї очищені гази з температурою 35°C виносять $0,4 \text{ Гкал/год}$ тепла у навколишнє середовище (близько 3% від загальної кількості одержаної теплової енергії).

Висновки

1. Ліквідація джерела забруднень у вигляді твердих побутових відходів при двостадійному способі спалювання: на крокуючій подині та потім у барботованому розплаві — дає можливість позбутися вторинних твердих відходів, які утворюються при традиційному спалюванні. У результаті плавки у барботованому розплаві утворюються гази, які містять продукти згорання й розкладу ТПВ та шлак, що складається із силікатів та оксидів металів.

Шлак можливо використовувати у будівельній промисловості для виготовлення мінеральної вати та виробів з неї, наповнювачів для бетону, фундаментних блоків, при будівництві доріг та ін.

Рідкий метал, що утворюється у розплаві, близький до складу чавуну. Його можна викори-

стовувати для лиття різних виробів або для подальшої переробки підприємствами чорної та кольорової металургії.

2. Додатково буде отримано 12,9 Гкал/год теплової енергії.

При роботі у період опалювального сезону впродовж 4000 год за сезон додатково буде отримано 51600 Гкал/год теплової енергії.

Список літератури

1. Как и где перерабатываются бытовые отходы в Украине. 30.07.2018. — URL: <https://nv.ua/ukraine/events/kak-i-hde-pererabatyvayutsja-bytovye-otkhody-v-ukraine-2485370.html> (дата звернення: 11.09.2018).

2. ISWA White Paper on Alternative Waste Conversion Technologies. January, 2013. — URL: <https://www.iswa.org/home/news/news-detail/browse/29/article/new-publication-iswa-white-paper-on-alternative-waste-conversion-technologies/109> (best date: 05.09.2018).

3. Жук Г.В., Нікітін Є.Є., Сміхула А.В., Дука О.В., Іванів О.С. Визначення оптимальних схем поводження з твердими побутовими відходами міст України. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2018. № 1. С. 48–61.

4. Hooshmand P., Khakrah H., Ballootaki H.K., Abdollahzadeh M.Y. Recycling municipal

solid waste utilizing gasification technology: a case study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 139. P. 2705–2718.

5. Irvine G., Lamont E.R., Antizar-Ladislao B. Energy from Waste: Reuse of Compost Heat as a Source of Renewable Energy. *International Journal of Chemical Engineering*. 2010. Vol. 2010. Article ID 627930. — <https://doi.org/10.1155/2010/627930>

6. Карп І.М., П'яних К.Є. Технологічні аспекти енергетичного використання твердих побутових відходів. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 3. С. 27–39.

7. Гречко А.В., Калинин Е.И., Денисов В.Ф. Переработка высоковлажных бытовых отходов в печи Ванюкова. *Цветная металлургия*. 1993, № 2. С.16–19.

8. Равич М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. Москва: Изд-во АН СССР, 1958. 278 с.

9. Снигур А.В., Праженник Ю.Г., Марчук Ю.В., Бондаренко Б.И. Термодинамическое моделирование процессов газификации горючей массы твердого топлива. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2017, № 12. С. 27–38.

10. Вукалович М.П., Кириллин В.А., Релизов С.А., Силецкий В.С., Тимофеев В.Н. Термодинамические свойства газов. М.: Машгиз, 1953.

Надійшла до редакції 22.02.21

**Олабин В.М., канд. техн. наук, Трухан С.П.,
Максимук А.Б., канд. техн. наук, Никитина И.В.**

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: omaksymuk@gmail.com

Утилизация твердых бытовых отходов двухстадийным сжиганием на подвижной подине и в барботируемом расплаве

Проанализировано состояние проблемы утилизации твердых бытовых отходов, которые находятся на свалках. Предложен комбинированный способ двухстадийного сжигания твердых бытовых отходов в период отопительного сезона. Приведены результаты расчетов тепловых балансов процессов испарения, сжигания на шагающей подине и в барботируемом расплаве, нагрева воздуха в рекуператоре, нагрева воды в контактном теплообменнике, котлов-утилизаторов и в системе горячего водоснабжения. Показано, что ликвидация источника загрязнений в виде твердых бытовых отходов при двухстадийном способе сжигания: на шагающей подине и затем в барботируемом расплаве — дает возможность избавиться вторичных твердых отходов,

которые образуются при традиционном сжигании. В результате плавки в барботируемом расплаве образуются газы, которые содержат продукты сгорания и разложения ТБО и шлак, состоящий из силикатов и оксидов металлов. *Библ. 10, рис. 3, табл. 1.*

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, загрузочный бункер, шагающая подина, барботажная печь, рекуператор, котел-утилизатор, контактный теплообменник, горячее водоснабжение.

Olabin V.M., *Candidate of Technical Sciences, Trukhan S.P., Maksymuk O.B.,* *Candidate of Technical Sciences, Nikitina I.V.*
The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
 39 Degtyarivska St., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: omaksymuk@gmail.com

Solid household waste disposal by double stage burning on walking beam and in the bubbled melt

State of the problem of solid waste disposal at landfills has been analyzed. A combined method of two stages of solid waste incineration during the heating season has been proposed. The results of calculations of thermal balances of evaporation processes, burning on a movable bottom and in a bubbled melt, heating of air in the recuperator, heating of water in the contact heat exchanger, boiler and in the hot water supply system has been presented. It is shown that the elimination of the source of pollution in the form of solid waste in a two-stage method of incineration: on a walking step and then in a bubbled melt — makes it possible to get rid of secondary solid waste generated by traditional incineration. As a result of melting in the bubbled melt gases are formed, which contain the products of combustion and decomposition of solid waste and slag consisting of silicates and metal oxides. *Bibl. 10, Fig. 3, Table 1.*

Keywords: domestic solid waste, loading hopper, walking beam, bubbled melt, recuperator, heat recovery boiler, contact heat exchanger, hot water supply.

References

1. [How and where is household waste recycled in Ukraine. 30.07.2018]. — URL: <https://nv.ua/ukraine/events/kak-i-hde-pererabatyvajutsja-bytovye-otkhody-v-ukraine-2485370.html> (beast date: 11.09.2018). (Rus.)
2. ISWA White Paper on Alternative Waste Conversion Technologies. January, 2013. — URL: <https://www.iswa.org/home/news/news-detail/browse/29/article/new-publication-iswa-white-paper-on-alternative-waste-conversion-technologies/109> (beast date: 05.09.2018).
3. Zhuk H.V., Nikitin E.E., Smikhula A.V., Dutka O.V., Ivaniv O.S. [Determination of the Optimal Schemes of Solid Waste Management in Cities of Ukraine]. *Energotechnologii i resursoberezhennje*. 2018. No. 1. pp. 48–61. (Ukr.)
4. Hooshmand P., Khakrah H., Ballootaki H.K., Abdollahzadeh M.Y. Recycling municipal solid waste utilizing gasification technology: a case study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 139. pp. 2705–2718.
5. Irvine G., Lamont E.R., Antizar-Ladislao B. Energy from Waste: Reuse of Compost Heat as a Source of Renewable Energy. *International Journal of Chemical Engineering*. 2010. Vol. 2010. Article ID 627930. — <https://doi.org/10.1155/2010/627930>
6. Karp I.M., Pyanykh K.Ye. [Technological Aspects of Energy Use of Solid Household Waste]. *Energotechnologii i resursoberezhennje*. 2019. No. 3. pp. 27–39. (Ukr.)
7. Grechko A.V., Kalinin E.I., Denisov V.F. [Recycling of high-humidity household waste in the Vanyukov furnace]. *Tsvetnaya metallurgy*. 1993. No. 2. pp. 16–19. (Rus.)
8. Ravich M.B. [Simplified methods of heat engineering calculations]. Moscow : Izdatelstvo AN SSSR, 1958. (Rus.)
9. Snigur A.V., Prazhennik Yu.G., Marchuk Yu.V., Bondarenko B.I. Thermodynamic modeling of solid fuel combustible weight gasification processes. *Energotechnologii i resursoberezhennje*. 2017. No. 12. pp. 27–38. (Rus.)
10. Vukalovich M.P., Kirillin V.A., Relizov S. A., Siletsky V.S., Timofeev V.N. Thermodynamic properties of gases. Moscow : Mashgiz, 1953. (Rus.)

Received February 22, 2021