

## SELECTION OF THERMAL TREATMENT TECHNOLOGIES TO UTILIZE MUNICIPAL SOLID WASTES AND ALTERNATIVE FUELS FOR THE ENERGY SECTOR OF UKRAINE

**A. Topal, I. Holenko**

*Institute of Coal Energy Technologies of NAS of Ukraine*

**L. Haponych**

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Municipal solid waste  
Alternative fuel  
Energy  
Technologies  
Processes  
Waste-to-energy*

---

**Article history:**

Received 05.11.2020  
Received in revised form  
19.11.2020  
Accepted 01.12.2020

---

**Corresponding author:**

L. Haponych  
**E-mail:**  
haponych@ukr.net

**ABSTRACT**

---

For the modern thermal treatment technologies of MSW/RDF to be introduced in the EU and Ukraine, it is necessary for them to comply with strict environmental requirements set out, in particular, within the EU directives (2010/75/EU, 2000/76/EU, etc.) regarding the operating parameters of new plants to be installed.

Today there is a number of proven and new/emerging thermal treatment technologies of solid waste/RDF which can be used for thermal processing of solid waste/RDF in Ukraine, but the features of their application, disadvantages and advantages, as well as the choice of optimal conditions for Ukraine must be carefully examined and defined.

In view of the above, the purpose of the study was to select and determine the most optimal technologies for thermal processing of solid waste and alternative fuels that could be implemented in Ukraine in the energy sector. The subject of the study was the processes and technological schemes of thermal utilization of solid waste/RDF, as well as their key technological parameters.

The main results of the work relates to the study of operation of the following proven and new/emerging technologies (processes) of thermal processing and their distinguished features: 1) direct combustion of solid waste/RDF while providing proper temperatures in a furnace to avoid dioxins /furans formation; 2) combustion of RDF in a circulating fluidized bed (CFB); 3) oxygen-blown gasification of not-sorted MSW; 4) air-blown gasification of RDF in a fluidized bed with intensive internal circulation); 5) gasification of RDF in a circulating fluidized bed etc.

The study was carried out relying upon the typical examples of industrial facilities in operation. Based on the study, recommendations were identified addressing the technological aspects, the technology selection principles and the feasibility of implementing each technology accounting for the needs of the energy and utilities sectors of Ukraine.

---

**DOI:** 10.24263/2225-2924-2020-26-6-13

---

## ВИБІР ТЕХНОЛОГІЙ ТЕРМІЧНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ТА АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ

О. І. Топал, І. Л. Голенко

*Інститут вугільних енерготехнологій НАН України*

Л. С. Гапонич

*Національний університет харчових технологій*

*Необхідною умовою впровадження сучасних технологій термічної переробки ТПВ/RDF в ЄС та Україні є додержання жорстких екологічних вимог, викладених, зокрема, у директивах ЄС (2010/75/ЄС, 2000/76/ЄС тощо) щодо режимних параметрів роботи нових установок.*

*На сьогодні існує низка випробуваних і нових технологій термічної переробки ТПВ/RDF, які можуть бути використані для термічної переробки ТПВ/RDF в Україні, але особливості їх застосування, недоліки й переваги, а також вибір оптимальної для умов України потребує ретельного визначення.*

*З огляду на зазначене метою дослідження є вибір і визначення найбільш оптимальних технологій термічної переробки ТПВ та альтернативних палив, які б можна було впровадити в Україні в енергетичному секторі. Предмет дослідження — процеси й технологічні схеми термічної утилізації ТПВ/RDF, а також їхні ключові технологічні параметри.*

*Основні результати дослідження полягають у вивченні особливостей експлуатації таких випробуваних і нових технологій (процесів) термічної переробки: 1) прямого спалювання ТПВ/RDF з додержанням належних температур у топковій камері; 2) спалювання RDF у циркулюючому киплячому шарі (ЦКШ); 3) кисневої газифікації несортованого ТПВ; 4) газифікації RDF на повітряному дутті в киплячому шарі з інтенсивною внутрішньою циркуляцією; 5) газифікації RDF у циркулюючому киплячому шарі (ЦКШ) тощо. Вивчення проведено на прикладах роботи промислових об'єктів. На основі дослідження визначені рекомендації щодо технологічних аспектів, вибору технологій і доцільності впровадження кожної з них для потреб енергетичного та комунально-побутового секторів України.*

**Ключові слова:** *тверді побутові відходи, альтернативне паливо, енергетика, технології, процеси, відходи в енергію.*

**Постановка проблеми.** На цей час утилізація твердих побутових відходів (ТПВ) в Україні відбувається вкрай застарілими й екологічно небезпечними методами: або захороненням на полігонах, або шляхом спалювання майже несортованого сміття (bulk MSW combustion) в потоці полум'я газових пальників на колосникових решітках.

Водночас нещодавно прийняті нормативні документи та Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 р. сприяють впровадженню сучасних екологічно безпечних методів і технологій термічної утилізації ТПВ та альтернативних палив на їх основі (зокрема refuse derived fuel (RDF) — вторинного відновленого палива).

За офіційною статистикою в Україні у 2018—2019 рр. обсяг збирання твердих побутових відходів (ТПВ) становив 50—60 млн м<sup>3</sup> (близько 12 млн т). Кількість ТПВ, що щорічно утворюється, приблизно становить 300—400 кг/людину. У 2019 р. в Україні перероблено й утилізовано лише 5,4% ТПВ, з них 1,7% спалено, а 3,7% потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні установки.

Водночас термічна утилізація відходів, яка відбувається без урахування особливостей морфологічного та елементного складу ТПВ, може призводити до утворення вкрай небезпечних для людини сполук (поліхлорованих вуглеводнів — діоксинів і фуранів, гранично допустимі концентрації яких становлять пікограми). Для запобігання небезпечному спалюванню ТПВ в ЄС існують жорсткі директиви (2010/75/ЄС, 2000/76/ЄС тощо [1—3]) щодо режимних параметрів нових теплових установок, які утилізують ТПВ та палива на їх основі — RDF (Refuse Derived Fuel)/SRF (Solid Recovered Fuel) [4; 5]. Вітчизняні нормативні документи, що розробляються, також сприяють поступовому витісненню спалювання несортованого ТПВ, замінюючи його або спалюванням RDF/SRF гарантованої якості, або іншими технологіями термохімічної переробки

Захоронення майже 95% необроблених ТПВ на полігонах призводить до щорічної втрати значної кількості енергоресурсів і цінних матеріалів, які містяться у відходах. За попередніми оцінками теплота згоряння ТПВ становить для міст України 4,8—7,0 МДж/кг, вона подібна до теплоти згоряння торфу та бурого вугілля (в країнах ЄС — 6—16 МДж/кг [4—5]).

Зараз у світі переважають технології (понад 60%), де застосовується пряме спалювання несортованих ТПВ у щільному шарі (у так званих «incinerator»-ах). Крім того, у світі існує стійка тенденція до застосування технологій «роздільного збирання» та «сортування» ТПВ. Сортування ТПВ не вирішує завдання повної утилізації відходів, а їх відокремлена частина, що містить органічну складову, має використовуватись для виробництва електричної та теплової енергії в екологічно безпечний спосіб. Отже, розробка та впровадження екологічно безпечних методів утилізації ТПВ та альтернативних палив на їх основі, зокрема RDF, є актуальною проблемою, вирішення якої потребує системного та науково-обґрунтованого підходу.

Серед сучасних чистих технологій, які розробляються, або, вважається, вже набули статусу випробовуваних у промисловому масштабі, слід виділити такі типові процеси: технології прямого спалювання з додержанням належних температур у топковій камері з використанням систем глибокого очищення продуктів згоряння (наприклад, вуглецевих фільтрів); технології парокисневої газифікації несортованого ТПВ; технології газифікації RDF у циркулюючому киплячому шарі (ЦКШ); технології газифікації RDF на повітряному дутті в киплячому шарі з інтенсивною внутрішньою циркуляцією; технології спалювання RDF у ЦКШ.

Перспективність їх впровадження в Україні потребує врахування місцевих особливостей для створення оптимального технічного рішення, зважаючи на вітчизняні умови та світовий досвід.

У зв'язку із вищезазначеним **метою дослідження** є аналіз досвіду впровадження типових представників технологій термічної переробки, які використовуються для утилізації ТПВ, RDF/SRF на промисловому рівні; визначення їхніх недоліків і переваг; обрання найбільш перспективних для впровадження в

Україні з урахуванням локальних умов (щодо обсягів і характеристик відходів) і розроблення відповідних рекомендації.

**Викладення основних результатів дослідження.** Узагальнений досвід використання технологій термічної переробки твердих побутових відходів та альтернативних палив їх основи в країнах ЄС викладено у табл. 1 [6].

*Таблиця 1. Поширення використання технологій термічної переробки ТПВ та альтернативних палив на їх основи за видом процесу чи/та технологічного обладнання*

Технологія або тип утилізації	ТПВ	Решта відходів, які не становлять небезпеку	Небезпечні відходи	Стічні води	Медичні відходи
Колосникові решітки прямого/зворотного ходу, у т. ч.	56%	43%	0 %	0%	0%
вібраційні	0%	0%	11%	0%	0%
рухомі	24%	27%	0%	0%	0%
ланцюгові колосникові	12%	10%	0%	0%	0%
- водоохолоджувані	22%	48%	17%	0%	0%
- решітка з обертювальною піччю	0,5%	0%	2%	0%	0%
Обертювальної печі	2%	0%	70%	0%	0%
Топки з нерухомим подом	0%	0%	0%	0%	67%
Нерухомі топки	0%	0%	16%	0%	0%
Топки киплячого шару	2%	13%	0%	90%	0%
Топки циркулюючого киплячого шару (ЦКШ)	3%	8%	0%	10%	0%
Реактори піролізу	0%	0%	0%	0%	0%
Станцій з газифікації	0,5%	0%	0%	0%	33%

Видно, що у переважній більшості (за обсягом потужності) для термічної переробки ТПВ використовуються спалювання на різних типах решіток і лише незначна кількість припадає на інші технології, які є перспективними та лише починають поступове впроваджуватися (спалювання у ЦКШ, газифікація тощо).

Діапазон продуктивності заводів з переробки відходів різних типів, які встановлені у ЄС, змінюється в широких межах (табл. 2) [6].

*Таблиця 2. Середня продуктивність заводів з переробки ТПВ у ЄС*

Країна	Середня продуктивність заводів-інсінераторів з переробки ТПВ, тис. т/рік
Австрія	178
Бельгія	141
Данія	114
Фінляндія	180
Франція	113
Німеччина	256
Італія	161
Нідерланди	488
Португалія	390
Іспанія	264
Швеція	136
Велика Британія	246
Норвегія	60
Швейцарія	110

Є заводи, що переробляють близько 1 млн т ТПВ на рік, але середня продуктивність (по ЄС) близько 190 тис. т на рік.

Типова одинична продуктивність заводів з термічної переробки ТПВ залежно від типу технології, що використовуються, наведена у табл. 3 [6].

*Таблиця 3. Типові діапазони одиничної продуктивності заводів із термічної переробки ТПВ/альтернативних палив на їх основі за видом технології*

Технологія/обладнання	Типова одинична потужність, т/добу
Рухома решітка	120—720
Киплячий шар (КШ)	36—200
Обертова піч	10—350
Піроліз	10—100
Газифікація	250—500

З огляду на наведені дані, доцільно розглянути особливості кожної технології в контексті її недоліків/переваг і можливого вибору для використання в енергетичному секторі України.

*Спалювання несорттованих ТПВ у топкових камерах з рухомою решіткою.* Технології спалювання на решітці є найпоширенішими серед технологій, які використовуються для утилізації твердих побутових (зазвичай, несорттованих) відходів [7; 8]. Особливості технології та процесу: перед спалюванням паливо фактично не подрібнюється і не підсушується. Завдяки високому вмісту вологи вихідного палива досягти високих температур у топковій камері та відповідного додержання вимог з витримки продуктів згоряння упродовж не менше 2 с при температурі понад 1200°C не вдасться без використання допоміжного палива — природного газу. Водночас використання таких інсенеаторів (на основі спалювання в нерухомому шарі) для утилізації ТПВ залишається найпоширенішим у світі.

До ключових переваг технології слід віднести: відсутність етапу сортування ТПВ (немає витрат на сортування, крім видалення металевих і габаритних предметів); відсутність етапу паливопідготовки (подрібнення), є лише магнітна сепарація.

До ключових недоліків технології слід віднести: неможливість вилучити цінні продукти для вторинного (неенергетичного) використання; утворення надзвичайно шкідливих (канцерогенних) продуктів згоряння — діоксинів і фуранів; обмежена можливість використання шлаку.

*Газифікація несорттованих ТПВ у потоці на парокисневому дутті [7; 9].* Серед перспективних технологій утилізації несорттованих побутових відходів деякий час розглядалась технологія парокисневої газифікації несорттованих ТПВ у потоці (наприклад, Thermoselect). Особливістю процесу було використання кисневого дуття в нижній частині газифікатора для досягнення високих температур у цій зоні близько 1600—2000°C з метою формування рідкого шлаку.

Водночас на виході газифікатора досягались температури синтез-газу близькі до 1200°C. Це забезпечувало розпад поліхлорованих вуглеводнів завдяки необхідному часу перебування синтез-газу (понад 2 с) в зоні підвищених температур (понад 1200°C). Крім того, різке охолодження синтез-газу на виході газифікатора впорскуванням води не давало можливості відновитись поліхлорованим вуглеводням.

Отриманий на виході синтез-газ передбачалось очистити та в подальшому використовувати для різних цілей: прямого спалювання для отримання теплової або електричної енергії; або виробництва цінних хімічних продуктів (водню, метанолу, аміаку тощо). Шлак у вигляді металів, який утворився від неорганічної складової відходів, міг би використовуватись у подальшому.

У світі було збудовано декілька потужних газифікаційних заводів з переробки ТПВ за технологією Thermoselect. Так, у Німеччині в м. Karlsruhe збудований завод TESS (Thermoselect Stuwest); введення в експлуатацію відбулось у 1999 р.; потужність з переробки ТПВ: 247,5 тис. т/рік; склад: три лінії, кожна продуктивністю 11 т/год; використання синтез-газу: спалювання у котлі-утилізаторі, що виробляє пар для парової турбіни (теплопостачання населенню). Найбільш поширеними стали такі газифікаційні заводи в Японії, де технологія була доопрацьована. Наприклад, на заводі Kawasaki Steel Chiba, що належить Kawasaki Steel Corporation; введення в експлуатацію відбулось у вересні 1999 р.; потужність заводу з переробки ТПВ: 110 тис. т/рік; склад: дві лінії, кожна продуктивністю 6,88 т/год; використання синтез-газу: спалювання у двигуні Jenbacher GasEngine та на заводі Chiba Works.

До ключових переваг технології слід віднести: відсутність етапу сортування ТПВ (немає витрат на сортування); можливість використання шлаку; низький рівень викидів (відповідає вимогам ЄС); фактична відсутність викидів діоксиду/фурану; часткове вилучення цінних продуктів (розплавлені метали) для вторинного (неенергетичного) використання (recycling).

До ключових недоліків технології слід віднести: значні капітальні витрати (CAPEX); значні експлуатаційні витрати (OPEX); складність процесу.

*Газифікація вторинного палива (RDF) у ЦКШ [10].* Технології газифікації у ЦКШ добре відпрацьовані принаймні на вугіллі. Особливістю реактора газифікатора є робота на порівняно низьких температурах 900—920°C, повітряне дуття та багаторазова внутрішня циркуляція матеріалу в контурі газифікатора (газифікатор-циклон). Паливо для газифікатора — RDF, яке не містить залізних предметів, є подрібненим належним чином до 1—5 см.

Типова технологічна схема газифікації RDF/SRF випробувана в промисловому масштабі на ТЕЦ Lahti, Фінляндія (застосовані технології Metso, Foster Wheeler): в основі технологічного процесу на ТЕЦ Lahti Energia II є газифікація RDF/SRF (Metso). Переробляється 250 тис. т RDF/рік; теплова потужність ТЕЦ — 90 МВт для централізованого теплопостачання; електрична потужність — 50 МВт; у складі ТЕЦ — два ЦКШ-газифікатори тепловою потужністю 80 МВт кожний.

До ключових переваг технології слід віднести: низький рівень викидів (відповідає вимогам ЄС), інтегрованість у концепцію «роздільного збирання» та «сортування».

Ключові недоліки технології: необхідність «сортування» та паливо-підготовки (подрібнення); більш складний процес, ніж просте спалювання; проблеми з утилізацією золи; більші CAPEX/OPEX (порівняно зі stoker-спалюванням на решітці).

*Спалювання та газифікація вторинного палива (RDF) у киплячому шарі з розвиненою внутрішньою циркуляцією на повітряному дутті та формуванням шлаку.* Зазначена технологія (IC-FBC, фірми Ebara, Японія) [11—13] відрізня-

ється оригінальним підходом та урахуванням недоліків вищеперелічених процесів. Особливістю запропонованого реактора з киплячим шаром є надзвичайна висока внутрішня циркуляція матеріалу шару завдяки специфічній геометрії нижньої частини реактора й організації повітряного дуття.

Випарні поверхні винесені із зони активної циркуляції у пристінні кишені для запобігання абразивному зношенню. Характерна особливість технологічної схеми полягає у використанні отриманого низькокалорійного синтез-газу для переплавлення леткої золи (виносу) з газифікатора при високих температурах. Фактично це дає змогу отримати «осклований» шлак, який позбавлений недоліків леткої золи, притаманної ЦКШ-процесу (при низьких температурах). У подальшому продукти згоряння синтез-газу використовуються в котлі-утилізаторі для виробництва пари й централізованого теплопостачання.

Зазначена технологія набула промислового поширення в Японії переважно на котлах малої та середньої паропродуктивності (в межах 20—50 т пари /год).

До ключових переваг технології слід віднести: низький рівень викидів (відповідає вимогам ЄС); інтегрованість у концепцію «роздільного збирання» та «сортування»; можливість використання шлаку; можливість використання більш грубо подрібненого RDF або ТПВ.

Ключові недоліки технології: необхідність «сортування» та паливо-підготовки (подрібнення); більш складний процес, ніж просте спалювання; незначна потужність парових котлів, що залучені до складу технологічної схеми; більші CAPEX/OPEX (відносно технологій із спалюванням).

*Спалювання вторинного палива в циркулюючому киплячому шарі.* Технології спалювання в циркулюючому киплячому шарі є добре відпрацьованими принаймні на різних видах палива [14—16]. Для потужних ТЕС, які спалюють вугілля, досяжна електрична потужність енергоблоків, до складу яких входять ЦКШ-парогенератори, становить 300—600 МВт. У світі існує позитивний досвід спалювання RDF/SRF у ЦКШ котлах, щоправда меншої потужності,

Особливість процесу спалювання у ЦКШ RDF/SRF полягає в роботі топкової камери на порівняно низьких температурах 900—920°C та забезпеченні багатократної внутрішньої циркуляції матеріалу в контурі (топкова камера-циклон-топкова камера). Паливо має подрібнюватись до розміру 1—5 мм. Зазначена технологія набула промислового поширення по всьому світу на котлах паропродуктивності (до 900—950 т пари/год). До ключових переваг технології слід віднести: низький рівень викидів (відповідає вимогам ЄС); інтегрованість у концепцію «роздільного збирання» та «сортування»; можливість використання більш грубоподрібненого RDF або ТПВ. Ключові недоліки технології: необхідність «сортування» та паливопідготовки (подрібнення); обмежена можливість використання золи (потребує дослідження).

## **Висновки**

На підставі здійсненого аналізу поточного стану розвитку технологій, що використовуються для утилізації ТПВ, RDF/SRF з урахуванням особливостей морфологічного й елементного складу ТПВ в Україні, а також тенденцій і розвитку екологічного законодавства в Україні та країнах ЄС, можна зробити такі висновки щодо вибору і впровадження розглянутих технологій в енергетичному та комунально-побутовому секторах України:

1. В Україні накопичено та продовжує накопичуватись значна кількість несортованих твердих побутових відходів/ТПВ, що зберігаються на тисячах полігонів, більшість з яких є несанкціонованими звалищами сміття. Кількість ТПВ, що щорічно утворюється, приблизно становить 300—400 кг/людину.

2. Зараз у світі переважають технології (понад 60%), де застосовується пряме спалювання несортованих ТПВ у щільному шарі (у так званих «incinerator»-ах). Водночас у світі існує стійка тенденція до застосування технологій «роздільного збирання» та «сортування» ТПВ.

3. Зазвичай, досягнення повного (100%) роздільного збирання досягнути не вдається і на частку вторинного палива (SRF/RDF), отриманого з відходів, припадає 15—30%, яке має енергетичну цінність (9—16 МДж/кг).

4. Отже, в Україні існує потреба у в оптимальному виборі, розробці та впровадженні нових екологічно безпечних технологій термічної переробки ТПВ/вторинного палива, які можна було б використати для отримання теплової та електричної енергії.

Здійснений аналіз дає змогу узагальнити рекомендації щодо вибору та впровадження різних технологій утилізації ТПВ та палив на їх основі залежно від їх опрацьованості та екологічних наслідків:

1. Спалювання несортованого ТПВ у щільному шарі на решітці слід вважати застарілим. Воно потребує значних витрат природного газу на підтримання спалювання відходів, не забезпечує якості золошлакових відходів, необхідної для їх подальшого використання.

Метод слід вважати неперспективним для поширення в Україні з огляду на відсутність можливості інтеграції в концепцію «роздільного збирання» та ресайклінгу; можливим є застосування лише за певних умов: глибоке очищення продуктів згоряння тощо.

2. Спалювання RDF у щільному/рухомому шарі на решітці слід вважати можливим та перспективним засобом утилізації палив з ТПВ з огляду на відпрацьованість процесу, його дешевизну та надійність роботи обладнання. Водночас необхідною вимогою впровадження є укомплектування таких заводів очисним обладнанням (від викидів оксидів азоту, двооксиду сірки та пилу).

3. Незважаючи на привабливість отримання синтез-газу та вторинних субпродуктів (металів тощо), впровадження парокисневої газифікації несортованих ТПВ в Україні на цей час недоцільне (або вкрай обмежене) з огляду на відсутність можливості інтеграції в концепцію «роздільного збирання» та значних фінансових витрат (на OPEX/CAPEX).

4. За умов розвитку ринку RDF в Україні слід вважати газифікацію вторинного палива (RDF) в циркулюючому киплячому шарі (ЦКШ) на повітряному дутті помірно перспективною (у зв'язку із складністю організації стабільних експлуатаційних показників обладнання). Рішення щодо впровадження технології потребує ретельного аналізу в рамках ТЕО для обраних локальних умов.

5. Газифікацію вторинного палива (RDF) в киплячому шарі з розвиненою внутрішньою циркуляцією (аналоги IC-FBC) на повітряному дутті та формуванням шлаку слід вважати перспективною для впровадження в Україні з урахуванням відпрацьованої потужності установок.



6. Технологію спалювання вторинного палива (RDF) в циркулюючому киплячому шарі слід вважати перспективною для впровадження в Україні в межах відпрацьованої потужності установок, у тому числі значної потужності.

### **Література**

1. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union*. 22.11.2008. L 312. P. 3—30. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>.

2. Commission Decision of 18 December 2014 amending Decision 2000/532/EC on the list of waste pursuant to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council Text with EEA relevance. *Official Journal of the European Union*. 30.12.2014. L 370/44. URL: <http://data.europa.eu/eli/dec/2014/955/oj>.

3. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). *Official Journal of the European Communities*. 2010. L 334. P. 17—119. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>.

4. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration. Frederik Neuwahl, Gianluca Cusano, Jorge Gómez Benavides, Simon Holbrook, Serge Roudier. JRC. 2019. 764 p. doi: 10.2760/761437, ISBN 978-92-76-12993-6. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/075477b7-329a-11ea-ba6e-01aa75ed71a1/language-en>.

5. Naponych L. S., Golenko I. L., Topal A. I., Legislation, current situation and prospects of using municipal solid waste as energy resource in Ukraine. *The problems of general energy*. 2019. № 3(58), С. 45—54. URL: <https://doi.org/10.15407/pge2019.03.045>.

6. Буляндра О., Гапонич Л., Голенко І., Топал О. Перспективи використання палива з твердих побутових відходів на ТЕЦ цукрових заводів. *Наукові праці НУХТ*. 2020. Том 26, № 3. С. 137—146. URL: DOI: 10.24263/2225-2924-2020-26-3-16.

7. Themelis N., Barriga M., Estevez P. et al. Guidebook for the Application of Waste to Energy Technologies in Latin America and the Caribbean. WTE Guidebook. EEC/IDB. Columbia University. 2013. 228 p. URL: [http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/pressreleases/Guidebook\\_WTE\\_v5\\_July25\\_2013.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/pressreleases/Guidebook_WTE_v5_July25_2013.pdf).

8. Гапонич Л. С., Голенко І. Л., Топал А. И., Перспективы использования SRF и RDF на цементных заводах Украины. *Екологічні науки*. 2020. № 3(30). С. 92—97. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.15>.

9. Yamada S., Shimizu M., Miyoshi F. JFE Technical report. 2014. No. 3. P. 21—26.

10. Advancing CFB technology brochure Sumitomo SHI FW. URL: [https://www.shi-fw.com/wp-content/uploads/2020/05/Brochure\\_CFB\\_29Apr20e.pdf](https://www.shi-fw.com/wp-content/uploads/2020/05/Brochure_CFB_29Apr20e.pdf).

11. Hirota T., Ohshita T., Kosugi S. et al. Characteristics Of The Internally Circulating Fluidized Bed Boiler, Technical Report. Ebara Corporation. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/CHARACTERISTICS-OF-THE-INTERNALLY-CIRCULATING-BED-Ohshita-Kosugi/dda22b0be0c1a6067f88e2b18b95edc48b0d267b?p2df>.

12. Fluidized-bed incinerator system TIF. EBARA environmental plant. URL: <https://www.eep.ebara.com/en/products/incineration.html>.

13. Fluidized-bed gasification and ash melting system TIGF. EBARA environmental plant. URL: <https://www.eep.ebara.com/en/products/melting.html>.

14. EU, “Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration”, European Commission, Brussel. 2006. 602 p. URL: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wt\\_bref\\_0806.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wt_bref_0806.pdf).

15. Mutz D., Hengevoss D., Hugi C. et al. Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management. A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Eschborn, May 2017. 58 p. URL: [https://www.giz.de/en/downloads/GIZ\\_WasteToEnergy\\_Guidelines\\_2017.pdf](https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf).

16. Вольчин І. А., Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику країни, І. А. Вольчин, Н. І. Дунаєвська, Л. С. Гапонич, М. В. Чернявський, О. І. Топал, Я. І. Засядько. К.: ГНОЗІС, 2013, 310 с.