

РЕСУРСНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ЗАЛИШКОВИХ ФРАКЦІЙ З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Приходько В.Ю.

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

вул. Львівська, 15, 65016, м. Одеса

vks26@ua.fm

В статті розглянуто залишкові відходи у складі твердих побутових відходів, охарактеризований склад групи та наповнення в залежності від системи роздільного збирання. Так, до залишкових відходів відносяться не тільки традиційні залишки або відсів, а й фракції, що містяться у незначній кількості та не мають ресурсної цінності, а також залишки від сортування роздільно зібраних фракцій. Критерієм «залишковості» є не тільки вміст у загальній масі, а й можливості поводження з відходами на даному етапі становлення системи управління відходами. За умов невідсортованого потоку залишкові відходи складаються із біодеградабельних (деревина, текстиль, шкіра, кістки) неорганічних (каміння), небезпечних (засоби особистої гігієни), гуми та відсіву або змішаних відходів. З міжнародного досвіду, основним варіантом поводження із залишковими відходами є вироблення палива. Залишкові відходи мають певний енергетичний потенціал і є джерелом для виробництва альтернативних палив з відходів на заводах механіко-біологічної обробки. Показано, що у випадку налагодженої системи роздільного збирання на «суху» і «вологу» фракції, сортування вторинної сировини можливо досягнути максимальної калорійності залишкових відходів із теплою згоряння 14,3-16,4 МДж/кг, а за умов вилучення відсіву – до 21,5 МДж/кг. Проте така система роздільного збирання значно зменшує обсяги потенційної сировини із залишкових відходів: від 350-450 кг/т на заводах механіко-біологічної обробки з відновленням енергії до 130-150 кг/т за умов роздільного збирання із сортуванням. Параметри, що визначають можливість вироблення палива з відходів, також включають; морфологічний склад та кількість побутових відходів, якість окремих складових (макулатури, текстилю, пластику тощо), що визначають робочу теплоту згоряння отриманого палива.

Ключові слова: залишкові відходи, енергетичний потенціал, роздільний збір, теплота згоряння, RDF, SRF.

Resource potential of residues from municipal solid waste. Prykhodko V.

The article considers residual waste as a part of municipal solid waste, describes the composition of the group and its content depending on the separate collection system. Thus, residual waste includes not only traditional residues or miscellaneous, but also fractions contained in small quantities and having no resource value, as well as residues from sorting separately collected fractions. The criterion of 'residual' is not only the content in the total mass of waste, but also the possibilities of waste management at this stage of the waste management system development. In an unsorted flow, residual waste consists of biodegradable (wood, textiles, leather, bones), inorganic (stones), hazardous (personal care products), rubber and miscellaneous or mixed waste. According to international experience, the main option for managing residual waste is fuel production. Residual waste has a certain energy potential and is a source for the production of alternative fuels from waste at mechanical and biological treatment plants. It has been shown that in the case of an implemented system of separate collection into 'dry' and 'wet' fractions, and additional sorting of secondary raw materials, it is possible to achieve the maximum calorific value of residual waste with a calorific value of 14.3-16.4 MJ/kg, and up to 21.5 MJ/kg if miscellaneous are removed. However, such a separate collection system significantly reduces the volume of potential raw materials from residual waste: from 350-450 kg/t at mechanical and biological treatment plants with energy recovery to 130-150 kg/t under conditions of separate collection with additional sorting. The parameters that determine the possibility of producing fuel from waste also include the waste composition and quantity of municipal solid waste, the quality of individual components (waste paper, textiles, plastics, etc.) that determine the working heat of combustion of the resulting fuel. *Key words:* residual waste, energy potential, separate collection, calorific value, RDF, SRF.

Постановка проблеми. Посилення негативних наслідків прогресуючого накопичення твердих побутових відходів (ТПВ) у довкіллі вимагає, серед іншого, впровадження різних моделей використання ресурсного потенціалу окремих компонентів. Це дозволить зменшити використання первинної сировини та знизити негативний вплив на довкілля від місць видалення відходів. Морфологічний склад ТПВ охоплює широке коло відходів (біля 70 компонентів), які за речовинною ознакою можна згрупувати у такі групи: біодеградабельні відходи; вторинні матеріальні ресурси; інертні мінеральні відходи та інші (залишкові) відходи. Перехід від лінійних економічних моделей виробництва та споживання до циркулярних вимагає наближення до zero waste,

коли відходи набувають статусу вторинних ресурсів. На сьогодні такими є традиційні види вторинної сировини – макулатура, пластик, скло, метали. Започатковується виокремлення та переробка найбільшої з фракцій ТПВ – органічних відходів, які легко розкладаються. Але складність сучасного споживання супроводжується багатокомпонентним складом утворених відходів, що стає значною перешкодою для їх повторного використання, рециклінгу чи відновлення. Певною невизначеністю характеризується група залишкових відходів – як за компонентним складом, так і за можливостями використання, що й обумовлює актуальність дослідження.

Зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. Розробка і запровадження ефек-

тивних систем управління ТПВ з метою запобігання екологічним наслідкам прогресуючого накопичення відходів є завданням світової спільноти. Так, серед 17 цілей сталого розвитку щонайменше 4 стосуються питання відходів. Курс на максимальне залучення відходів у виробничі цикли вимагає розробки відповідних технологій до кожної групи, в т.ч. й до залишкових відходів, що утворюються як наслідок посилення комплексності морфологічного складу сучасних ТПВ. Проблема використання ресурсного потенціалу залишкових відходів з ТПВ з урахуванням суттєвої частки в загальній масі відходів (від 10%) вимагає розробки практичних рішень, які зводяться до спалювання або захоронення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженню складу ТПВ з позицій використання ресурсного потенціалу присвячено чимало наукових досліджень [1-4], проте залишкові відходи здебільшого залишаються поза фокусом. Це також характерно для зарубіжних досліджень з управління відходами, хоча в класифікаціях залишкові або інші відходи визначені як «miscellaneous waste» [5] та «others», або окремо «miscellaneous inorganic waste». Попри те, що бракує інформації щодо складу та кількості утворених залишкових відходів, простежується загальна тенденція щодо їх захоронення або термічної утилізації. Так, технології WTE (Waste-to-Energy) визнані перспективними у сфері управління ТПВ [6], а паливо з відходів у вигляді RDF (Refuse Derived Fuel) та SRF (Solid Recovered Fuel) відноситься до відновлюваних джерел енергії [7-9], (хоча, відповідно до Закону України «Про альтернативі джерела енергії», до цієї категорії відноситься лише біогаз – продукт анаеробної ферментації органічних відходів). Отже, **серед питань, які вимагають детальних досліджень** – характеристика залишкових відходів та їх ролі у ефективній системі управління ТПВ.

Наукова новизна та значення представленого дослідження полягають у характеристиці групи залишкових відходів та визначенні їх енергетичного потенціалу.

Викладення основного матеріалу. З позицій управління ТПВ, тобто відповідно до можливостей виокремлення та використання ресурсного потенціалу відходів, є певна група відходів, яка може бути позначена як «залишкові відходи», до складу якої входять: 1) фракції, що містяться у незначній кількості та не мають ресурсної цінності на даному етапі запровадження системи управління відходами; 2) залишки від сортування роздільно зібраних фракцій: ресурсоцінних та змішаних відходів; 3) не ідентифіковані за складом відходи, що містяться у незначній кількості (залишки, відсів).

Залишкові відходи можна розглядати у складі загального потоку ТПВ за відсутності роздільного збирання відходів, коли вся маса відходів спрямовується на захоронення на звалищах і полігонах.

В цьому випадку залишкові відходи – це, скоріше, невизначені та некласифіковані компоненти, окремий вміст яких незначний. Проте сумарний вміст неідентифікованої групи може виявитися вагомим (від 10%). Зазначимо, що за умов стихійного відбору певних ресурсоцінних фракцій або сортування змішаних відходів на спеціалізованих підприємствах з переробки відходів, вміст поняття «залишкові відходи» буде також стосуватися неідентифікованих відходів. Інша річ, коли залишкові відходи виникають при налагодженій системі роздільного збирання та сортування роздільно зібраних фракцій (рис. 1).

Залишкові відходи у складі ТПВ – це незначні за вмістом відходи, які на даному етапі розвитку систем управління відходами не можуть бути використані повторно або перероблені та/або які неможливо класифікувати у складі комплексних груп відходів (біоорганічні відходи, відходи електричного та електронного обладнання, відходи ремонту тощо). Отже, не тільки вміст у загальній масі, а й можливості поводження з відходами є критерієм «залишковості». Наприклад, серед небезпечних відходів виділяють, наприклад, батарейки та акумулятори, що містяться в незначній кількості у ТПВ, проте для них розроблений та впроваджений підхід щодо адресного збору та наступного знешкодження.

Аналіз даних з морфологічного складу ТПВ у розрізі залишкових відходів (невідсортований потік). Дослідження морфологічного складу ТПВ є основою для оцінки вмісту залишкових відходів. Враховуючи Методичні рекомендації з визначення морфологічного складу побутових відходів (2024), серед основних компонентів ТПВ оберемо ті, що можна охарактеризувати як залишкові за вмістом (табл. 1).

Як бачимо, у складі залишкових відходів є органічні та неорганічні складові, проте самі відходи – це потенційне джерело для вироблення палива з відходів.

Вироблення альтернативного палива з калорійних фракцій ТПВ. Сучасний світовий досвід у сфері сміттєспалювання заохочує спалювання залишків від сортування у вигляді RDF, а не самих відходів. Основна ідея виробництва альтернативного палива з ТПВ полягає у відборі калорійної фракції, яка немає ресурсної цінності. Це можуть бути як залишкові відходи (табл. 1), так і залишки від сортування ресурсоцінних фракцій, які не використовуються (табл. 2).

Одним з підходів щодо виокремлення калорійної фракції з ТПВ з наступним використанням як сировини для виробництва палива є комплексна переробка, зокрема, механіко-біологічна обробка (МБО). Серед завдань, пов'язаних із управлінням побутовими відходами, які визначені у Національній Стратегії управління відходами в Україні до 2030 року, є створення пілотних проектів з виробництва палива на базі об'єктів МБО.



Рис. 1. Диференціація потоку ТПВ з фокусом на залишкових відходах

Таблиця 1

Характеристика залишкових відходів (невідсортований потік)

Компонент	Вміст у ТПВ, % [1, 2, 7]			Класифікаційна ознака відходів
Деревина	1,75			Біодеградабельні
Гума	0,2	1,7	2,2	
Шкіра	0,5			
Кістки	0,1			
Каміння	6,1			Неорганічні
ЗОГ	1,4			Небезпечні
Залишки	5,4-18			Змішані

Таблиця 2

Компоненти ресурсоцінних фракцій, які не переробляються

Фракція	Компоненти, які не переробляються
Паперова	Забруднений папір, чеки, серветки та паперові рушники, вироби з переробленого паперу, які не підлягають переробці, паперові стаканчики
Текстильна	Одноразовий одяг, дрантя, забруднене в процесі використання, спідня білизна та одяг, який неможливо використати повторно
Пластикова	Пластик без маркування, з маркуванням 3 (ПВХ) або 7 (Інші), плівки («шуршик»), багатошарове пакування, забруднений їжею пластик

На заводах МБО відбувається вилучення та/або відновлення калорійної (паливної) фракції ТПВ для виробництва RDF/SRF (рис. 2). Це є основною цільовою функцією таких заводів. Вихід легкої фракції для виробництва RDF оцінюється у 350-450 кг з 1 т ТПВ [1].

Неодмінна умова отримання сировини для виробництва RDF – суха фракція залишків. Отже,

така фракція підпадає під відновлення шляхом спалювання з утилізацією отриманого тепла (R1). Як бачимо, певне розділення на «суху» і «вологу» фракцію відбувається на етапі сортування на заводі МБО. За умов відбору лише ресурсоцінних компонентів цінність залишкової маси як палива знижується через наявність вологи з харчових відходів. Водночас така маса є більш стабільною на полігоні.



Рис. 2. Диференціація потоку ТПВ на заводах МБО, що працює за технологією відновлення енергії [1]



Рис. 3. Схема матеріальних потоків відходів за умови роздільного збирання та досортування на сміттесортувальних лініях

Проте найбільш ефективна диференціація потоку ТПВ можлива за організованого роздільного збирання з відведенням органічних відходів, які легко розкладаються, із загального потоку в момент утворення (рис. 3).

Розглянемо матеріальний баланс отримання сировини з відходів за умови роздільного збирання та досортування отриманих фракцій на сміттесортувальній лінії. Припустимо, що непридатна для переробки макулатура складає 15% від загального обсягу цієї фракції у ТПВ. Багатошарове пакування – це висококалорійна фракція ТПВ, вміст якої оцінюється на рівні 0,5%. Також врахуємо приблизну структуру пластикових відходів, з яких приблизно 20% складають полімери, які не переробляються (з маркуванням «5», «6» та «7»). Склад залишкових відходів залишається відповідно до схеми на рис. 1, тобто це текстиль, деревина, гума та шкіра.

Розрахунок матеріального балансу за схемою на рис. 3 показав, що вихід висококалорійної фракції для виробництва RDF становитиме 128-143 кг на 1 т

ТПВ. Вона складатиметься щонайменше із залишків відсортованої фракції і залишкових відходів. Це є певною перевагою, порівняно із сортуванням загального потоку на МБО (рис. 2), оскільки спалювання, навіть з метою ліквідації відходів, має значний негативний вплив на довкілля.

Враховуючи вміст та теплоту згоряння залишкових відходів (табл. 3), визначимо теплоту згоряння суміші. Так, теплота згоряння суміші з наведених фракцій відходів складає 14,31-16,35 МДж/кг, що відповідає пороговому значенню у 14,4 МДж/кг, коли спалювання відходів можливе без додаткового палива. Якщо не враховувати відсів < 15мм з найнижчою теплою згоряння, розрахована теплота згоряння суміші становитиме 18,57-21,5 МДж/кг, а це фактично теплота згоряння біогазу. В цьому випадку суміш відходів відповідає вимогам до SRF – якісне паливо з ТПВ з теплою згоряння більше 15 МДж/кг. На наведені результати значно впливає морфологічний склад ТПВ та фактична теплота згоряння фракцій (з табл. 3 видно, що вона

Таблиця 3

Характеристики складових для виробництва RDF з ТПВ

Компонент	Вміст у ТПВ, % [1, 2, 7]	Вміст у сировині, %	Теплота згоряння, МДж/кг [1, 8]	Вологість, % [8]
Текстиль	3,4	18,5	15,72-16,2	20
Папір	2,1	11,4	9,49-13,4	25
Багатошарове пакування	0,5	2,7		
Гума, шкіра	2,2	12,0	25,8-33,5	5,0
Деревина	1,9	10,3	14,46-14,7	20
Пластик	1,16	6,3	24,37-33,6	-
ЗОГ	1,1	6,0	29,5*	25
Відсів < 15мм	5,5	30	4,6	20
Інші	0,5	3,0	18,14	8,0

* розраховано автором за осередненим складом матеріалів у складі підгузки без врахування вологи

варіює в залежності від складу компоненту та джерела отримання даних).

Як бачимо з результатів, роздільний збір з обов'язковим виокремленням вологих відходів є важливою умовою для виробництва палива із залишків.

Попри те, що за розрахунками [9] в Україні є потенціал для щорічного виробництва 1,5-2,0 млн. т RDF/SRF з теплою згоряння 15,0-17,0 МДж/кг, перспективи його використання на цементних заводах ускладнюються через певні фактори. Так, є вимоги щодо палива, яке приймає цементний завод, а також питання логістики і вартості приймання. З іншого боку, використання RDF/SRF є механізмом зменшення викидів парникових газів в цементній промисловості. Реальним механізмом використання RDF в Україні може стати паливом для теплової електростанції (на прикладі м. Хмельницький). Якість RDF може погіршуватися через вологість (якщо не сортувати на «суху» і «вологу» фракції) та наявність небезпечних компонентів.

Головні висновки. Отже, група залишкових відходів є багатоконпонентною, але вагомою у загальній масі ТПВ (10-18%), а її наповнення

залежить від впровадження системи управління ТПВ в громаді. До факторів, які визначатимуть кількість та склад залишкових відходів, належать організація роздільного збирання, наявність сортування та стан використання вторинної сировини. На сьогодні основним способом поводження із залишковими відходами є їх захоронення. Проте доведено, що ці відходи мають енергетичний потенціал і можуть бути залучені в технології WTE. Показано, що за умов роздільного збирання, особливо з виокремленням вологих відходів, теплотворна здатність палива із залишкових відходів підвищується до 21,5 МДж/кг (порівняно з вихідними ТПВ, що мають теплоту згоряння 4-7 МДж/кг). За таких умов також зменшується і кількість спалюваних залишків, а це означає зменшення впливу на довкілля від спалювання.

Перспективи використання результатів дослідження. Наведені результати щодо ефективного використання ресурсного потенціалу залишкових відходів свідчать про необхідність запровадження ефективних моделей управління ТПВ на початку життєвого циклу відходів.

Література

1. Практичні аспекти управління відходами в Україні : посібник / Барінов М.О. та ін. Київ, 2021. 118 с.
2. Ілляш О.Є., Голік Ю.С., Чепурко Ю.В., Серга Т.М. Аналіз компонентного складу побутових відходів різних міст України. *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг* : кол. мон. / за ред. проф. Мальованого М. С. Київ, 2023. С. 106-119.
3. Сафранов Т.А., Приходько В.Ю., Яновський Д.Ю. Ресурсоцінний потенціал потоку твердих побутових відходів Одеської області. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. № 32. С. 144-156.
4. Голік Ю.С., Крот О.П., Серга Т.М. Тверді побутові відходи як резерв енергетичного потенціалу міста. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження*. 2023 : кол. мон., Полтава, 2023. С. 37-47.
5. Lamborn J. Characterisation of municipal solid waste composition into model inputs. *Hydro-Physico-Mechanics of Landfills: Third International Workshop*, 2009. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228507204> (Last accessed: 15.07.2025)
6. Hefa Cheng, Yuanan Hu. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101. Issue 11. PP. 3816-3824. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852410000970> (Last accessed: 22.07.2025)
7. Veolia. Модульний підхід до формування індивідуальної системи поводження з відходами. *Waste Management – 2019: Презент. доп.* URL: <https://drive.google.com/file/d/1XaEsjcz1MT1iN4nt6B46IJECEGr5OKPW/view?usp=sharing> (дата звернення 20.06.2025)

8. Склярєнко Є.В. Методика визначення теплоти згоряння при виробництві палив з твердих побутових відходів із наперед заданими характеристиками. *SWorldJournal*. 2023. Issue 20. Part. 1. PP. 11-20. URL: <https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj20-01-008> дата звернення: 22.07.2025)
9. Гапоніч Л.С., Голенко І.Л., Топал О.І. Перспективи використання *SRF* та *RDF* на цементних заводах України. *Екологічні науки*. 2020. № 3(30). С. 92-97.
10. Preparation of Refuse-Derived Fuels (RDF) for use in the Cement Industry in Turkey: prepared by Jan Reichenbach, Laura Theophil. 2021. 57 p.

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: