

ESTIMATION OF POTENTIAL OF RDF PRODUCTION BASED ON FOUND TECHNOLOGICAL AND MORFOLOGICAL PROPERTIES OF MUNISIPAL SOLID WASTES OF UKRAINE

L. Haponych, O. Topal, I. Golenko

Thermal Energy Technology Institute of NAS of Ukraine

S. Kobzar

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Key words:

*Municipal solid waste
Recovered fuel
Heating value
Ultimate analysis
Waste to energy*

Article history:

Received 03.05.2022
Received in revised form
19.05.2022
Accepted 13.06.22

Corresponding author:

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

ABSTRACT

In Ukraine a significant amount of unsorted municipal solid waste (MSW) has been annually produced and accumulated. The annual amount of MSW being produced in Ukraine in recent years reaches 11.5—12.5 million tons, almost 95% of which is stored in landfills and dumps.

Meanwhile, the main goal of solid waste management should be an integrated approach in accordance with European priorities and best practices, in particular: separate collection, sorting, mechanical and biological treatment, composting/anaerobic fermentation of biodegradable solid waste fractions and RDF/SRF production from MSW fractions. The advantage of this approach is the conversion of waste into energy (WtoE) or, in particular, refused derived fuel (RDF)/solid recovered fuel (SRF), which can be accumulated, stored, transported and used in energy.

Production and use of RDF/SRF in energy sector can partially cover gap in fossil fuels in Ukraine which may arise for production of electricity and heat in compliance with EU requirements for waste management.

Features, volumes, morphological and elemental composition of municipal solid waste of Ukraine were estimated. The potential of RDF to be produced on the basis of the MSW of Ukraine in terms of cities and regions was analyzed and defined. It was found that heating value of unsorted MSW varies for regions of Ukraine within the range of 5.0—7.5 MJ/kg, for different cities of Ukraine 5.5—7.5 MJ/kg, averaged for Ukraine — 6.8 MJ/kg.

The share of useful solid waste components which can be recovered to produce RDF in Ukraine is 25—30%. It was shown that the potential for annual production of RDF in Ukraine is 2.8—3.2 million tons. The heating value of RDF made from municipal solid waste in Ukraine can be estimated as 13.1—15.9 MJ/kg, which corresponds to 3rd and 4th quality classes according to DSTU EN 15359:2018.

DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-3-6

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ВИРОБНИЦТВА RDF НА ОСНОВІ ВИЗНАЧЕНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І МОРФОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ УКРАЇНИ

Л. С. Гапонич, О. І. Топал, І. Л. Голенко

Інститут теплоенергетичних технологій НАН України

С. Г. Кобзар

Інститут технічної теплофізики НАН України

В Україні щорічно утворюється та накопичується значна кількість несорттованих твердих побутових відходів (ТПВ). За останні роки обсяги утворення ТПВ в Україні досягли рівня 11,5—12,5 млн т щороку, з них майже 95% зберігаються на полігонах і сміттєзвалищах.

Водночас головною метою поводження з ТПВ має бути комплексний підхід відповідно до європейських пріоритетів і підходів: окреме збирання, сортування, механіко-біологічна обробка, компостування/анаеробне зброджування фракцій ТПВ, що біологічно розкладаються, та виробництво RDF/SRF з фракцій ТПВ, що залишилися. Перевагою цього підходу є перетворення відходів в енергію (WtoE), зокрема у відновлене з відходів паливо (RDF/refused derived fuel), яке може накопичуватись, складуватись, транспортуватись і використовуватись в енергетиці за потреби.

Виробництво та використання в енергетиці RDF/SRF здатне частково задовольнити дефіцит в органічних паливах, який може виникнути в Україні, для виробництва електричної й теплової енергії з дотриманням вимог ЄС до питань управління відходами.

У статті виконано аналіз і визначені особливості, обсяги, морфологічний та елементний склад ТПВ і потенційного RDF на його основі для України в розрізі міст та областей тощо. Встановлено, що теплота згоряння необроблених (несорттованих) ТПВ становить для різних областей України 5,0—7,5 МДж/кг, для різних міст України — 5,5—7,5 МДж/кг, осереднена для України — 6,8 МДж/кг.

Частка складових ТПВ, яку можна вилучити для виробництва RDF, в Україні складає 25—30%. Показано, що потенціал щорічного виробництва RDF в Україні складає 2,8—3,2 млн т. Діапазон теплоти згоряння RDF, виготовленого з ТПВ України, становить 13,1—15,9 МДж/кг, що відповідає 3 та 4 класам якості згідно з ДСТУ EN 15359:2018.

Ключові слова: *тверді побутові відходи, паливо з відходів, теплота згоряння, елементний склад, відходи в енергію.*

Постановка проблеми. В Україні на рівні державних рішень і міжнародних зобов'язань задекларовано наміри щодо поступового переходу від викопних видів палива до альтернативних, у т. ч. на основі відновлювальних джерел енергії,

негативний вплив на довкілля яких у результаті використання/переробки є мінімальним або нульовим. Заміщення у паливно-енергетичному комплексі (ПЕК) України викопних палив, переважно вугілля та газу, які є обмеженими під час воєнного стану і, напевне, будуть обмеженими у повоєнний час, альтернативними, є надзвичайно актуальним. Серед альтернативних палив, які у довгостроковій перспективі можуть використовуватись у ПЕК України, є палива, вилучені з твердих побутових відходів (ТПВ). При термічній переробці таких палив утворюється енергія, яка може бути використана для виробництва електроенергії й теплоти. Використання технології «Відходи в енергію» («Waste-to-Energy» або WtoE) є одним з найбільш надійних та ефективних шляхів економії органічного палива та зменшення викидів парникових газів (Гапонич, Голенко & Топал, 2019; Astrup, Moller & Fruergaard, 2009; Neuwahl, Cusano, Benavides, Holbrook & Roudier, 2019). Водночас залучення в енергетику палив на основі ТПВ має відбуватись із забезпеченням їх термічної переробки в екологічно безпечний спосіб відповідно до вимог Директиви № 2010/75/ЄС про промислові викиди, виконання якої є одним із пріоритетів України в рамках підписаної Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом (ЄС), Європейським співтовариством з атомної енергії та їхніми державами-членами — з іншої сторони.

Зауважимо, що утворення ТПВ є і буде залишатись невід’ємною рисою життєдіяльності населення, що призводить до виведення з обігу значних територій та істотного забруднення довкілля (повітря, ґрунтів, водних ресурсів). Обсяги утворення ТПВ в Україні за останні роки сягають 11,5—12,5 млн т (60 млн м³) (табл. 1, узагальнені дані Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України і Державної служби статистики України).

Таблиця 1. Поводження з ТПВ в Україні у 2016—2020 рр.

Рік	Обсяги збирання		Пункти вторинної сировини		Сміттєпереробні підприємства		Ділянки компостування			Сміттєспальновальні установки		Полігони	
	тис. т	тис. т	%	тис. т	%	тис. т	тис. т	%	тис. т	%	тис. т	%	
2016	11562,6	126,6	1,1	143,8	1,2	1,6	256,7	2,2	11033,9	95,5			
2017	11271,2	146,2	1,3	259,9	2,3	1	246,7	2,2	10617,4	94,2			
2018	11857,2	146,5	1,2	260,1	2,2	1,6	208,1	1,8	11240,9	94,8			
2019	11459,4	128,6	1,1	303,3	2,6	1,2	199,2	1,7	10827,1	94,6			
2020	12634,9	118,7	0,9	336,5	2,6	6,2	181,3	1,4	11992,2	95,0			

Майже 95%, або 11—12 млн т зібраних і необроблених ТПВ вивозять та складають на полігонах і сміттєзвалищах. Таке поведження з ТПВ призводить до щорічної втрати значної кількості енергоресурсів та цінних матеріалів, погіршення екологічної ситуації. Згідно із Законом України «Про Основні засади (Стратегію) екологічної політики України на період до 2030 року» від 28.03.2019 розв’язання цієї проблеми є ключовим завданням у вирішенні питань енерго- та ресурснезалежності держави, економії природних матеріальних та енергетичних ресурсів. Закон передбачає зменшення до 35% обсягу складування відходів на полігонах у 2030 році.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сортивання ТПВ не в змозі вирішити завдання повної утилізації відходів. Відокремлена частина ТПВ, що містить органічну складову, має використовуватись для виробництва електричної й теплової енергії в екологічно безпечний спосіб. У світі поширені дві типові технології для відокремлення висококалорійних складових відходів, які можна використовувати для створення Refuse Derived Fuel/Solid Recovered Fuel (RDF/SRF) — механіко-біологічне оброблення (МБО) відходів з отриманням RDF/SRF палива та/або біогазу та суха стабілізація (Гелетуха, Жовмір, Олійник & Радченко, 2011; Budihardjo, 2022; Harponych, Golenko & Topal, 2019; Neuwahl, Cusano, Benavides, Holbrook & Roudier, 2019; Saveyn та ін., 2016). МБО відходів об'єднує механічні, такі як роздільне збирання, сортування за допомогою сит, барабанів, магнітів тощо, змішування, сушіння, подрібнення, пресування, гранулювання, та біологічні методи. Такі сировинні складові, як папір, скло, пластик і метал ідуть на переробку. Складові ТПВ, що біологічно розкладаються, можуть бути відправлені на компостування й анаеробне зброджування. Всі інші складові ТПВ, а це складає близько третини, є сировиною для твердого відновленого палива — RDF/SRF.

При застосуванні технології сухої стабілізації відходи без інертів та металів піддаються біологічній обробці — ефективно підсушуються до значень вологості менше 15% і стабілізуються за допомогою процесу компостування. При цьому утворюється паливо з високою теплою згоряння.

Термін «refuse» в англійськомовних країнах використовується для визначення твердих побутових і комерційних або промислових відходів. Термін RDF, зазвичай, відноситься до відокремленої висококалорійної складової ТПВ, що включає полімери, папір, картон, деревину й текстиль. Тобто RDF — це органічне паливо, яке отримується після видалення вторинної сировини та негорючих матеріалів із ТПВ. Що стосується SRF, то це паливо, отримане з безпечних відходів, в тому числі твердих побутових та промислових відходів, які можуть бути використані для виробництва енергії в установках спалювання або спільного спалювання з вугіллям. Отримане паливо може піддаватися додатковій обробці для збільшення теплоти згоряння. SRF має відповідати вимогам класифікації та специфікації, які були розроблені Технічним комітетом CEN/TC 343 «Solid Recovered Fuels» та викладені у європейському стандарті EN 15359:2011 «Solid recovered fuels — Specifications and classes». Згідно з цим стандартом обов'язкові для визначення властивості SRF включають форму і розмір частинок, нижчу робочу температуру згоряння, вміст вологи, золи, хлору і важких металів, зазначених у Директиві № 2010/75/ЄС. Також обов'язково вказується клас і походження SRF. SRF може використовуватися лише установками, що відповідають граничним значенням викидів, встановленим Директивою № 2010/75/ЄС. Схема класифікації SRF використовує три основні параметри: теплоту згоряння (економічну інформацію), концентрацію Cl (технічну інформацію) і Hg (екологічну інформацію) (табл. 2). Стандарт EN 15359:2011 прийнятий в Україні методом підтвердження на мові оригіналу (англійській) — «Тверде відновлювальне паливо. Технічні характеристики та класи (EN 15359:2011, IDT)».

Таблиця 2. Класифікація SRF згідно з ДСТУ EN 15359:2018

Класифікаційний параметр	Статистична міра	Одиниці вимірювання	Класи				
			1	2	3	4	5
Теплота згоряння	Середнє значення	МДж/кг	≥25,0	≥20,0	≥15,0	≥10,0	≥3,0
Хлор (Cl)	Середнє значення	% (на суху масу, <i>d</i>)	≤0,2	≤0,6	≤1,0	≤1,5	≤3,0
Ртуть (Hg)	Середнє значення	мг/МДж	≤0,02	≤0,03	≤0,08	≤0,15	≤0,50

Залежно від складу ТПВ і технології виробництва може бути отримано RDF/SRF з різною теплотою згоряння (3—25 МДж/кг) та виду — у вигляді порошку або гранул різного розміру й густини. Кількість RDF/SRF, що виробляється з ТПВ, може змінюватись від 25 до 55% (по масі) залежно від країни, типу збирання, методів обробки та вимог до якості (Neuwahl, Cusano, Benavides, Holbrook & Roudier, 2019). Перевагами цього підходу до переробки ТПВ є те, що відходи перетворюються на енергетичну товарну продукцію, яку можна накопичувати, складувати, транспортувати.

Світова практика показує, що RDF/SRF утилізується на заводах WtoE (при спільному спалюванні з вугіллям, при виробництві цементу) та на ТЕС і ТЕЦ (як комунальних, так і промислових) (Mutz, Hengevoss, Hugi & Gross, 2017). Виробництво і споживання RDF/SRF у світі щорічно збільшується (Kaza, Yao, Bhadatta, & Van Woerden, 2018; Themelis, Barriga, Estevez & Velasco, 2013). У США працює 12 заводів WtoE з добовою потужністю від 360 до 3000 т RDF. Ці заводи щорічно споживають близько 6 млн т RDF, що складає 20% потужності США. Серед країн ЄС використання RDF/SRF найбільш розвинуто в Німеччині, Італії, Австрії, Великій Британії. У Німеччині у 2005 р. було вироблено 1,8 млн т, у 2006 р. — 2,4 млн т, а у 2009 р. — 7,2 млн т RDF/SRF, причому 68% з них було спалено на заводах WtoE: 45% — за технологією спалювання на решітці, 23% — за технологією киплячого шару (Weber, Quicker, & Hanewinkel, 2020). У Польщі щорічно виробляється близько 4 млн т RDF. В Італії у 2019 р. було спожито 5,7 млн т RDF, 0,7 млн т SRF 3 класу та 0,6 млн т SRF 4 класу (табл. 3) (Cernuschi, та ін., 2020). Усього в країнах ЄС у 2017 р. було спожито близько 17,5 млн т RDF/SRF. Щорічний попит на RDF/SRF в Європі складає 53—63 млн т. В країнах ЄС на заводах WtoE споживаються RDF/SRF з теплотою згоряння 6,4—17,0 МДж/кг, при цьому середнє значення теплоти згоряння складає 10,3 МДж/кг.

Найбільшу ефективність відновлення енергії досягають ті установки WtoE, які виробляють теплову енергію. За результатами аналізу техніко-економічних показників роботи 314 установок WtoE в країнах ЄС встановлено, що середні витрати RDF/SRF (в одиницях умовного палива — у. п.) на виробництво 1 кВт·год. енергії на установках, які виробляють теплоту, становлять 435 г у. п./кВт·год., при сумісному виробництві теплової та електроенергії — 647 г у. п./кВт·год., при виробництві електроенергії — 1424 г у. п./кВт·год. (Reimann, 2012). 90% теплоти, яке споживає населення в Копенгагені, отримується за

рахунок спалювання RDF або відсортованих ТПВ, 85% — у Вільнюсі, 80% — у Стокгольмі, 60% — у Парижі.

Виробництво та використання в енергетиці RDF/SRF здатне частково замінити дефіцитні в Україні органічні палива. Водночас термічна утилізація відходів, яка відбувається без урахування особливостей їх морфологічного та елементного складу, може призводити до утворення вкрай небезпечних для людини сполук, таких як поліхлоровані вуглеводні або діоксини та фурани, гранично допустимі концентрації яких становлять пікограми (Neuwahl, Cusano, Benavides, Holbrook & Roudier, 2019). Крім того, в останні роки збільшилася кількість досліджень, присвячених розробці технологій спільного спалювання RDF/SRF з іншими паливами, в тому числі з природним газом і вугіллям (Кобзар, Топал, Гапонич & Голенко, 2020; Boavida, Abelha, Gulyurtlu & Cabrita, 2003; Lin, Ma, 2012; Rada, Cioca & Lonescu, 2017). Такі роботи щодо українського RDF також потребують інформації з його теплоти згоряння та складу, тому **метою дослідження** є оцінка потенціалу виробництва RDF на основі визначених технологічних і морфологічних властивостей ТПВ України.

Матеріали і методи. Ключовими характеристиками відходів є морфологічний, хімічний, фракційний склад і теплота згоряння. Ці характеристики ТПВ не є постійними, вони залежать від країни, регіону, міста чи селища їх утворення, сезону утворення. ТПВ — це механічна суміш різних за походженням і характеристиками компонентів, тому її склад є випадковим, оскільки до ТПВ можуть потрапляти різноманітні предмети та матеріали, але, разом з тим, він є прогнозованим за основними компонентами.

Морфологічний склад ТПВ — це структура його складових, яка виражена в процентах за масою. Міністерством з питань житлово-комунального господарства України затверджено Методичні рекомендації з визначення морфологічного складу ТПВ (Наказ № 39 від 16.02.2020 р.). Згідно з цим документом морфологічний склад ТПВ рекомендується визначати за такою класифікацією: харчові відходи (овочі, фрукти, відходи садівництва тощо); папір і картон; полімери (пластик, пластмаси); скло; чорні та кольорові метали; текстиль; деревина; шкіра, гума; небезпечні відходи (батареї, сухі та електролітичні акумулятори, тара від розчинників, фарб, ртутні лампи, телевізійні кінескопи тощо); кістки, залишок ТПВ після вилучення компонентів (дрібно будівельне сміття, каміння, вуличний змет тощо).

Елементний склад палива або його компонентів (на робочий стан) — це волога W^r , зола A^r , сірка S^r , вуглець C^r , водень H^r , кисень O^r та азот N^r . Нижча теплота згоряння на робочий склад палива Q_i^r , МДж/кг, для ТПВ та їх компонентів розраховується за формулою Менделєєва:

$$Q_i^r = 4,18(81C^r + 300H^r - 26(O^r - S^r) - 6(9H^r + W^r)) \cdot 10^{(-3)}.$$

Викладення основних результатів дослідження. На рис. 1 показано усереднений морфологічний склад ТПВ різних областей України та України в цілому. В Україні частка ТПВ, що накопичується у великих містах, є переважною. Тільки у м. Києві у 2019 р. зібрано 13% загальної кількості ТПВ України. На рис. 2 показано усереднений морфологічний склад ТПВ різних міст України.

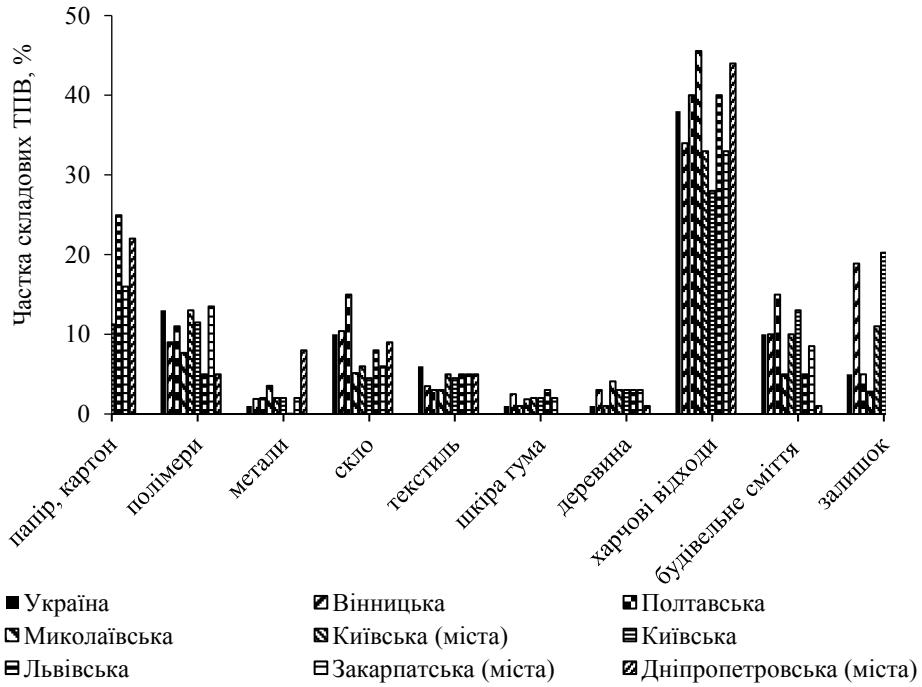


Рис. 1. Усереднений морфологічний склад ТПВ різних областей України та України в цілому, згрупований для складових ТПВ

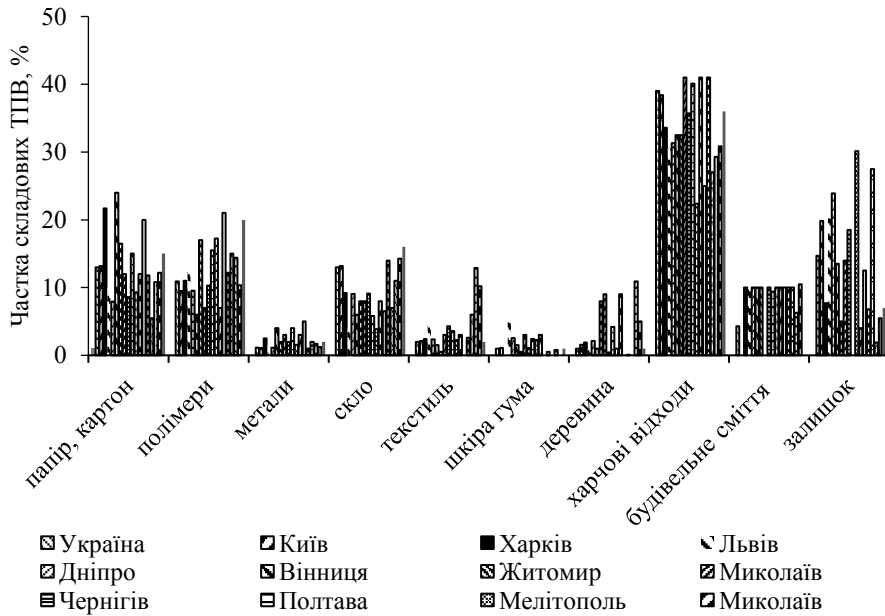


Рис. 2. Усереднений морфологічний склад ТПВ різних міст України та України в цілому, згрупований для складових ТПВ

Встановлено, що усереднений морфологічний склад ТПВ Україні такий: харчові відходи — 38%, папір і картон — 15%, полімери (пластмаса, ПЕТФ пляшки, полімерна плівка, ТетраПак упаковка) — 13%, скло — 10%, чорні та кольорові метали — 1%, текстиль — 6%, деревина — 1%, шкіра, гума — 1%, будівельне сміття — 5%, інші відходи (вуличний зміт, листя, гігієнічні засоби, кістки, комбіновані відходи, небезпечні відходи тощо) — 10%. Для великих міст України середній морфологічний склад ТПВ такий: харчові відходи — від 30 до 45%, папір та картон — від 5 до 24%, полімери — від 8 до 20%, скло — від 4 до 16%, чорні та кольорові метали від 0,5 до 5%, текстиль від 2 до 13%, деревина від 0,1 до 4%, шкіра, гума від 0,5 до 5%; дрібні будівельні відходи — від 0,3 до 3,5%; вуличний зміт, листя — від 0 до 6%; гігієнічні засоби від 2,3 до 3,5%; комбіновані відходи від 0,4 до 1%; небезпечні відходи від 0,1 до 0,5%, інше від 2 до 30%.

Фракційний склад ТПВ — це частка відходів певного розміру. Вміст різних фракцій коливається і суттєво залежить від країни, сезону, кліматичної зони тощо. Близько 2% від загальної маси ТПВ складають фракції розміром більше 350 мм (Каратєєва, Коваль & Гроза, 2018). Це великогабаритні відходи, зокрема побутова техніка, меблі, куски будівельних конструкцій. Близько 90% ТПВ має фракції менше 250 мм, 85% — менше 150 мм, менше 10% — 250—350 мм, 2% — фракції розміром більше 350 мм. Для ТПВ м. Київ спостерігається близький розподіл по фракціях: 88% ТПВ має фракції до 250 мм, 84% — до 150 мм, 10% — 250—350 мм, 2% — фракції розміром більше 350 мм (Шекель, 2011).

Хімічний склад ТПВ. У табл. 3, 4 наведено елементний склад, вихід летких і теплоту згоряння змішаних ТПВ для різних областей та міст та України в цілому. Для порівняння в табл. 4 наведено інформацію про елементний склад, вихід летких і теплоту згоряння змішаних ТПВ міст Європи, Канади, США та Японії (Cernuschi, та ін., 2020; Neuwahl, Cusano, Benavides, Holbrook & Roudier, 2019; Saveyn та ін., 2016; Themelis, Barriga, Estevez & Velasco, 2013). Елементний склад і вихід летких ТПВ (V^d , % на суху масу) розраховано за їх морфологічним складом (рис. 1, 2) та елементним складом компонентів ТПВ (Гапонич, Голенко & Топал, 2020; Komilis, Evangelou, Giannakis & Lympferis, 2012). Нижча теплота згоряння Q_i^f розрахована за формулою.

Таблиця 3. Елементний склад, вихід летких і теплота згоряння ТПВ різних областей України та України в цілому

Область України	Елементний склад на робочу масу (r), %							V^d , %	Q_i^f , МДж/кг
	C^r	H^r	O^r	N^r	S^r	A^r	W^r		
Вінницька	19,6	2,7	12,2	0,6	0,1	29,7	35,1	48,8	7,2
Дніпропетровська міста	19,4	2,7	16,4	0,7	0,1	22,9	37,8	56,6	6,6
	18,3	2,6	15,7	0,4	0,1	47,1	15,8	41,4	6,8
Закарпатська	21,2	3,0	17,6	0,6	0,1	25,0	32,5	51,5	7,5
Київська (міста)	20,8	2,9	17,2	0,6	0,1	25,6	32,8	55,2	7,4
Київська	19,5	2,7	16,3	0,5	0,1	28,6	32,3	51,5	6,8
Миколаївська	21,2	2,9	17,2	0,6	0,2	19,0	38,9	58,6	7,4
Полтавська	14,6	2,1	11,7	0,6	0,1	37,2	33,7	45,9	5,0
Україна	19,5	2,7	16,2	0,7	0,1	27,3	33,5	54,7	6,8

МЕХАНІЧНА ТА ЕЛЕКТРИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

Таблиця 4. Осереднений елементний склад, вихід летких і теплота згоряння ТПВ різних міст України (наші розрахунки), Європи, Японії, Канади та США (для порівняння)

Місто	Елементний склад на робочу масу (r), %							V^d , %	Q_i^r , МДж/кг
	C^r	H^r	O^r	N^r	S^r	A^r	W^r		
Для міст України									
Вінниця	19,7	2,8	17,1	0,4	0,2	27,0	32,8	53,4	6,8
Дніпро	17,6	2,5	14,4	0,5	0,1	29,7	35,2	49,2	6,1
Житомир	20,1	2,8	18,2	0,4	0,1	26,8	31,6	55,9	7,0
Київ	18,6	2,6	16,1	0,5	0,1	23,1	39	54,9	6,3
Миколаїв	19,5	2,7	14,5	0,6	0,2	26,0	36,5	53,3	6,9
Мелітополь	19,7	2,8	17,6	0,4	0,1	27,7	31,7	52,3	6,9
Полтава	20,7	2,9	16,6	0,6	0,2	25,0	34,0	56,9	7,4
Рівне	19,8	2,9	17,7	0,5	0,1	25,7	33,3	56,9	6,8
Суми	16,4	2,3	14,1	0,5	0,1	31,2	35,4	47,9	5,5
Харків	19,2	2,7	17,6	0,5	0,1	28,1	31,8	54,2	6,5
Хмельницький	19,5	2,8	19,2	0,3	0,1	30,5	26,7	54,2	6,7
Хмельницький	19,6	2,7	16	0,8	0,1	31,2	29,6	51,3	6,9
Черкаси	17,6	2,5	16	0,5	0,1	30	33,3	38,2	5,9
Чернігів	17,1	2,4	14,4	0,6	0,1	29,5	35,9	50,3	5,8
Для порівняння									
Амстердам (Королівство Нідерландів)	22,2	1,5	8,3	0,2	0,3	43,3	24,2	н/д	7,6
Берн (Швейцарія)	21,4	2,3	15,9	0,3	0,2	31,0	28,9	н/д	7,2
Брюссель (Бельгія)	22,1	1,5	8,8	0,3	0,3	40,3	26,7	н/д	7,5
Вашингтон (США)	24,7	3,1	19,0	0,4	0,1	27,6	25,1	55,5	8,9
Лондон (Велика Британія)	21,0	2,0	12,3	0,3	0,2	38,7	25,5	н/д	7,2
Оттава (Канада)	25,6	3,2	18,1	0,4	0,1	25,5	27,1	57,8	9,3
Париж (Франція)	24,2	3,0	19,0	0,3	0,1	28,2	25,2	н/д	8,6
Токіо (Японія)	21,5	2,3	12,5	0,6	0,2	25,2	37,7	н/д	7,4
Гельсінкі (Фінляндія)	26,3	3,4	23,4	0,2	0,1	22,0	24,6	н/д	9,2

Теплота згоряння необроблених (несортованих) ТПВ становить для різних областей України 5,0—7,5 МДж/кг, для різних міст України 5,5—7,5 МДж/кг, осереднені для України — 6,8 МДж/кг. Для порівняння, теплота згоряння ТПВ країн ЄС становить 6,5—15 МДж/кг, Японії — 7,4 МДж/кг, а Канади та США — 9,0—9,3 МДж/кг. Теплота згоряння полімерних складових може коливатися в межах 17—40 МДж/кг (Cernuschi, та ін., 2020). Елементний склад та теплота згоряння деяких полімерних складових наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Характеристика деяких полімерних складових ТПВ

Речовина	Елементний склад, %					Q_i^r , МДж/кг
	C^r	H^r	O^r	N^r	Cl^r	
1	2	3	4	5	6	7
Поліакриламід	47,40	4,92	15,25	14,43	—	19,3

1	2	3	4	5	6	7
Полівінілацетат	45,76	5,74	30,50	—	—	17,9
Полівінілхлорид	31,73	4,02	—	—	46,25	14,7
Ізопреновий каучук	52,23	7,95	11,64	10,17	—	24,4
Поліпропілен	70,27	11,73	—	—	—	35,7
Полістирол	76,10	5,90	—	—	—	31,7
Поліетилен	70,27	11,73	—	—	—	35,7
Поліетилентерефталат	51,25	3,44	27,31	—	—	17,8
Поліаміди	31,90	4,84	7,05	6,23	—	14,8

Окрім елементів, наведених в табл. 2—6, змішані ТПВ містять важкі метали та шкідливі речовини. ТПВ Німеччини містять (на суху масу, d): $F^d = 0,01—0,035\%$, $Cl^d = 0,1—1,0\%$, $Pb^d = 100—2000$ мг/кг, $Cd^d = 1—15$ мг/кг, $Cu^d = 200—700$ мг/кг, $Zn^d = 400—1400$ мг/кг, $Hg^d = 1—5$ мг/кг, $Tl^d < 0,1$ мг/кг, $Mn^d = 250$ мг/кг, $V^d = 4—11$ мг/кг, $Ni^d = 30—50$ мг/кг, $Co^d = 3—10$ мг/кг, $As^d = 2—5$ мг/кг, $Cr^d = 40—200$ мг/кг, $Se^d = 0,21—15$ мг/кг, ПХБ (поліхлоровані дифеніли) = $0,2—0,4$ мг/кг, ПХДД/ПХДФ (поліхлоровані дибензодіоксини/ поліхлоровані дибензофурані) = $50—250$ нгДЕ/кг (ДЕ — діоксиновий еквівалент у системі міжнародних коефіцієнтів токсичності, синонім I-TEQ) (Neuwahl, Cusano, Benavides, Holbrook & Roudier, 2019). Українські ТПВ містять: $As^d \leq 6$ мг/кг, $Pb^d \leq 3000$ мг/кг, $Cd^d \leq 50$ мг/кг, $Cr^d \leq 2810$ мг/кг, $Cu^d \leq 1000$ мг/кг, $Mn^d \leq 200$ мг/кг, $Ni^d \leq 189$ мг/кг, $Hg^d \leq 15$ мг/кг, $Zn^d \leq 4000$ мг/кг (Петрук, Васильківський, Іщенко & Петрук, 2013).

В Україні кадмій Cd, Hg, Tl та їх сполуки за наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309 «Про затвердження нормативів гранично допустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел» відносяться до I класу небезпеки. Ртуть — одна з найбільш небезпечних токсичних речовин. Вона є глобальним забруднювачем навколишнього середовища. Основними джерелами надходження ртуті з ТПВ є ртутні лампи, термометри, інші прилади, що містять ртуть, та елементи живлення (Wilson & Symon, 2019). Надходження ртуті, що міститься як домішка в різних матеріалах, які є складовими ТПВ, потенційно може бути істотним, але важко оцінюється, головним чином, через відсутність даних з вихідного вмісту ртуті у відходах.

Визначення типових особливостей морфологічного та елементного складу RDF/SFR з урахуванням особливостей його формування в Україні. На рис. 3 та 4 для різних регіонів та міст України показано кількісний показник частки ТПВ придатних для виробництва RDF — відокремленої висококалорійної фракції перероблених ТПВ, яка включає полімери, папір, картон, деревину та текстиль. Кількісний показник таких залишків для різних регіонів України складає $23,0—42,0\%$ від загальної кількості ТПВ. В середньому для України частка складових ТПВ придатних для RDF складає 28% .

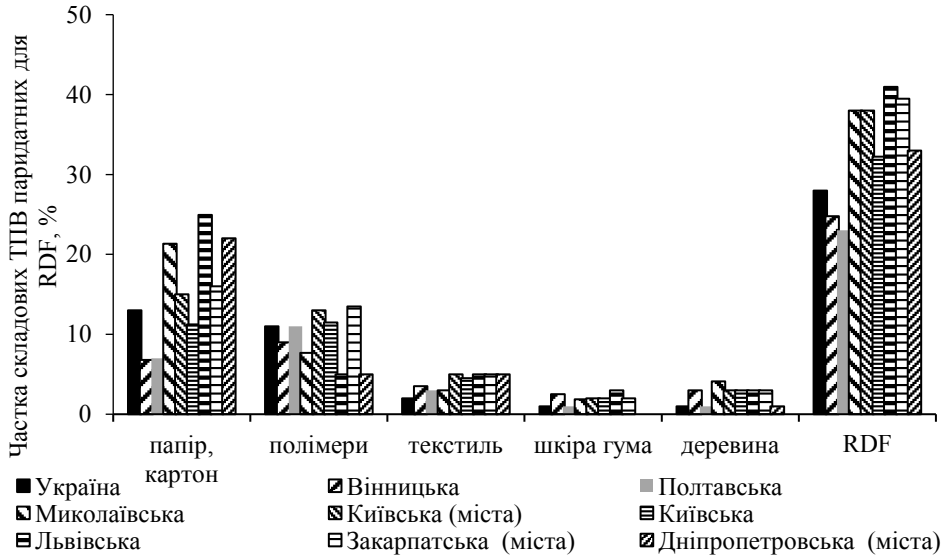


Рис. 3. Частки складових ТПВ придатних для RDF для різних областей України

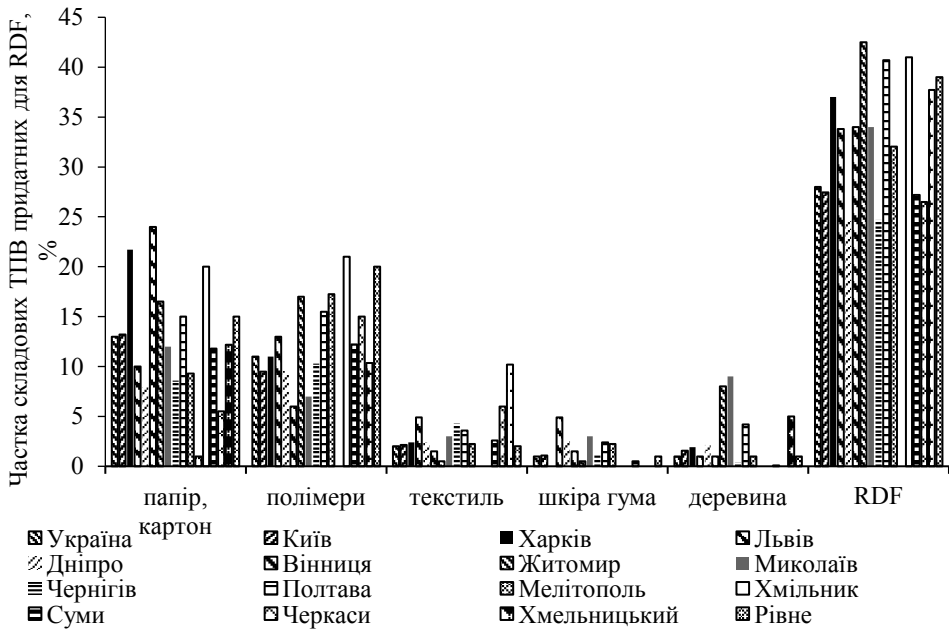


Рис. 4. Частки складових ТПВ придатних для RDF для різних міст України

Треба зазначити, що в останні роки на пункти вторинної сировини та сміттєпереробні підприємства потрапляє 3,4—3,7% від загальної кількості зібраних ТПВ (табл. 3), з них близько 80% (у середньому 2,8% загальної кількості ТПВ)

припадає на папір, картон, деревину, полімери. З урахуванням цього частка складових ТПВ, яку можна вилучити для виробництва DF в Україні, складає 25—26% (табл. 6). У табл. 7 наведено можливий морфологічний склад DF, виготовленого з ТПВ України.

Таблиця 6. Потенціал виробництва RDF в Україні для 2016—2020 рр.

Рік	Обсяги збирання тис. т	Пункти вторинної сировини		Сміттєпереробні підприємства			Частка складових придатних для виробництва RDF		Потенціал виробництва RDF	
		%	тис. т	%	тис. т	%	тис. т	%	тис. т	
2016	11562,6	1,1	126,6	1,2	143,8	28,0	3237,5	26,2	3029,4	
2017	11271,2	1,3	146,2	2,3	259,9	28,0	3155,9	25,1	2829,1	
2018	11857,2	1,2	146,5	2,2	260,1	28,0	3320,0	25,3	3000,0	
2019	11459,4	1,1	128,6	2,6	303,3	28,0	3208,6	25,0	2864,9	
2020	12634,9	0,9	118,7	2,6	336,5	28,0	3537,8	25,2	3184,0	

Потенціал виробництва RDF в Україні складає 2,8—3,2 млн тонн. Можливий морфологічний склад RDF для різних областей, міст та України в цілому показано на рис. 5 та 6.

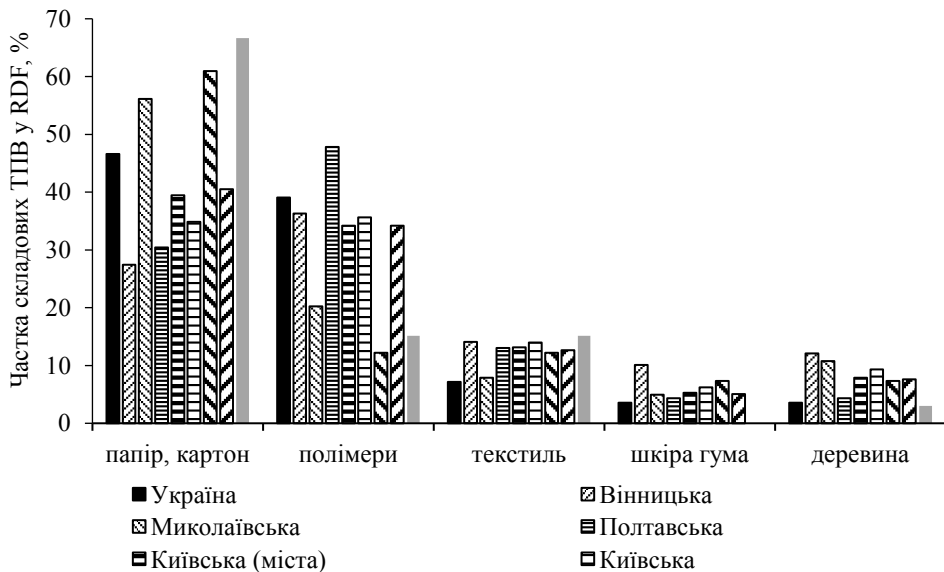


Рис. 5. Можливий морфологічний склад RDF для різних областей та України в цілому

У табл. 8 та 9 наведено елементний склад, вихід летких і теплоту згоряння RDF для різних областей та міст та України в цілому. Елементний склад і вихід летких RDF розраховано за їх морфологічним складом (рис. 5 та 6, табл. 8) та елементним складом компонентів ТПВ (Гапонич, Голенко & Топал, 2020; Komilis, Evangelou, Giannakis & Lymperis, 2012).

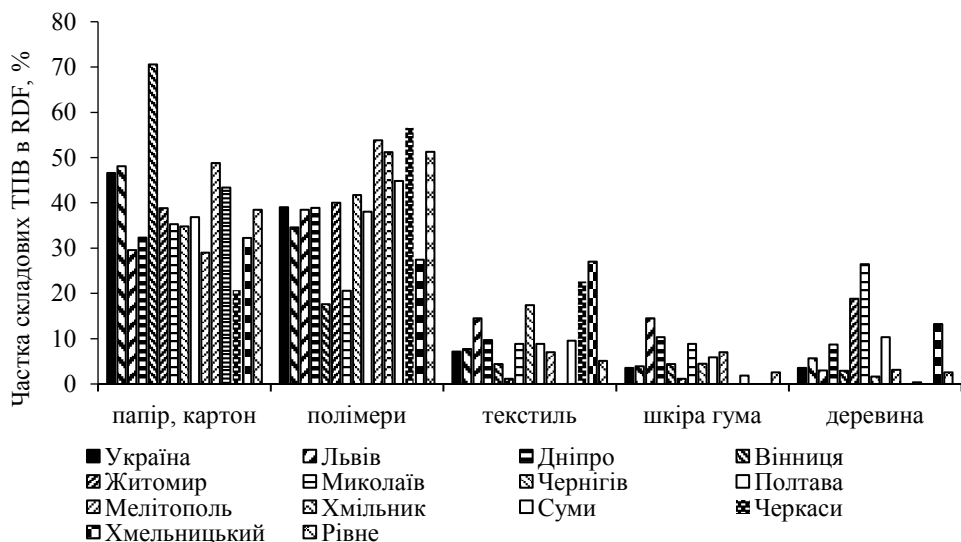


Рис. 6. Можливий морфологічний склад RDF для різних міст та України в цілому

Таблиця 7. Можливий морфологічний склад RDF для України

Складові RDF	Діапазон, %	Середнє значення, %
Папір, картон та інша макулатура	25,0—67,0	47,0
Полімери, в тому числі пластик, поліетилен, поліпропілен, синтетичні волокна, багатошарова упаковка та т. п.	18,0—57,0	39,0
Шкіра, шкірозамінники, шкіряні та гумові вироби	1,5—14,5	3,5
Текстиль різних типів	1,5—27,0	7,0
Деревина та похідні від неї	2,0—12,0	3,5

Таблиця 8. Елементний склад, вихід летких і теплота згоряння RDF, виготовленого з ТПВ різних областей України та України в цілому (власні розрахунки)

Область України	Елементний склад на робочу масу (r), %							V^d , %	Q_i^r , МДж/кг
	C^r	H^r	O^r	N^r	S^r	A^r	W^r		
Вінницька	40,4	5,6	30,6	0,7	0,3	10,2	12,2	74,0	15,9
Дніпропетровська міста села	39,1	5,3	36,4	0,8	0,2	7,0	11,2	78,0	14,5
	37,2	5,3	31,2	0,7	0,3	14,0	11,3	75,6	14,5
Закарпатська	38,9	5,4	33,2	0,7	0,2	9,9	11,7	76,0	14,8
Київська (міста)	39	5,4	33,1	0,7	0,3	9,8	11,7	75,9	14,9
Київська	39,2	5,5	32,4	0,7	0,3	10,0	11,9	75,5	15,1
Миколаївська	39,4	5,4	34,2	0,5	0,2	7,8	12,5	76,0	14,9
Полтавська	37,7	5,3	33,2	0,7	0,2	11,9	11,0	76,6	14,4
Україна	37,6	5,3	34,6	0,4	0,2	10,9	11,0	77,2	14,1

Таблиця 9. Елементний склад, вихід летких та теплота згоряння RDF виготовленого з ТПВ різних міст України (власні розрахунки)

Місто	Елементний склад на робочу масу (r), %							V^d , %	Q_i^r , МДж/кг
	C^r	H^r	O^r	N^r	S^r	A^r	W^r		
Вінниця	39,3	5,4	35,7	0,4	0,2	7,9	11,1	77,1	14,7
Дніпро	40,0	5,6	31,2	0,5	0,4	10,8	11,5	74,5	15,7
Житомир	35,5	5,0	34,6	0,2	0,2	10,4	14,1	76,5	13,1
Запоріжжя	39,0	5,3	33,5	1,2	0,1	7,9	13,0	74,9	14,8
Київ	38,1	5,3	34,4	0,5	0,2	10,1	11,4	76,8	14,3
Миколаїв	40,3	5,5	30,9	0,5	0,3	7,3	15,2	73,0	15,6
Мелітополь	37,5	5,4	32,6	0,4	0,3	13,2	10,6	76,2	14,5
Полтава	38,4	5,4	32,9	0,5	0,2	10,5	12,1	75,7	14,7
Рівне	36	5,2	34,7	0,4	0,2	12,7	10,8	77,7	13,5
Суми	36,9	5,2	35,1	0,5	0,2	11,7	10,4	78,0	13,8
Харків	37,0	5,1	36,4	0,4	0,2	9,3	78,1	11,6	13,6
Хмельник	34,7	5,0	36,5	0,2	0,2	12,9	79,0	10,5	12,7
Хмельницький	39,0	5,3	33,5	1,2	0,1	7,9	13,0	76,3	14,7
Черкаси	5,2	33,9	33,9	1,0	0,2	12,9	10,2	77,9	13,8
Чернігів	38,8	5,4	33,2	0,8	0,2	11,0	10,5	76,7	14,8

Окрім елементів, наведених у табл. 8 і 9, RDF містить важкі метали та шкідливі речовини. Типовий вміст у RDF цих величин (на робочу масу, r) такий: хлор $Cl^r \leq 0,8\%$, свинець $Pb^r = 130\text{—}300$ мг/кг, кадмій $Cd^r = 4\text{—}9$ мг/кг, мідь $Cu^r = 235\text{—}500$ мг/кг, ртуть $Hg^r = 0,6\text{—}1,2$ мг/кг, талій $Tl^r = 1\text{—}2$ мг/кг, марганець $Mn^r = 150\text{—}300$ мг/кг, ванадій $V^r = 10\text{—}25$ мг/кг, нікель $Ni^r = 50\text{—}100$ мг/кг, кобальт $Co^r = 8\text{—}12$ мг/кг, миш'як $As^r = 5\text{—}13$ мг/кг, срібло $Sr^r = 85\text{—}140$ мг/кг, сурьма $Sb^r = 50\text{—}150$ мг/кг, олово $Sn^r = 35\text{—}70$ мг/кг.

Діапазон теплоти згоряння RDF, виготовленого з ТПВ України, складає 13,1—15,9 МДж/кг. Це відповідає 3 та 4 класам SRF згідно з ДСТУ EN 15359:2018 (див. табл. 4). Для збільшення теплоти згоряння RDF можна додавати горючі фракції промислових і комерційних відходів.

Наші розрахунки показують, що в Україні є потенціал для щорічного виробництва 2,8—3,2 млн т RDF з теплою згоряння 13—16 МДж/кг, або 1,3—1,6 млн т у. п. При залученні цих палив в енергетику можна отримати щорічно близько 1900—500 млн кВт·год. теплової та електричної енергії, або 2800—3800 млн кВт·год. теплової енергії. Потенціал заміщення природного газу при цьому 1,0—1,3 млрд м³, вугілля — 1,6—2,2 млн т.

Висновки

1. Щорічні обсяги утворення ТПВ в Україні за останні роки сягають 11,5—12,5 млн т, з яких вивозять і складають на полігонах та сміттєзвалищах 11—12 млн т. Таке поводження з відходами призводить до щорічної втрати значної кількості енергоресурсів та цінних матеріалів, погіршення екологічної ситуації.

2. Показано, що основна тенденція в управлінні ТПВ має базуватись на комплексному підході — окремому збиранні, сортуванні, компостуванні/анаеробному зброджуванні фракцій ТПВ, що біологічно розкладаються, та виробництві RDF/SRF з фракцій ТПВ, що залишилися. Перевагою цього підходу є перетворення відходів на енергетичну товарну продукцію.

3. Виробництво та використання в енергетиці RDF/SRF здатне частково замінити дефіцитні в Україні органічні палива при виробництві електричної та теплової енергії з дотриманням вимог ЄС до питань управління відходами.

4. Виконано аналіз та визначено особливості, обсяги, морфологічний та елементний склад ТПВ і потенційного RDF на його основі для України в розрізі міст та областей тощо. Показано, що теплота згоряння необроблених (несортованих) ТПВ становить для різних областей України 5,0—7,5 МДж/кг, для різних міст України 5,5—7,5 МДж/кг, осереднена для України — 6,8 МДж/кг.

5. Частка складових ТПВ, яку можна вилучити для виробництва RDF в Україні, складає 25—30%. Показано, що потенціал щорічного виробництва RDF в Україні складає 2,8—3,2 млн т. Визначено, що діапазон теплоти згоряння RDF, виготовленого з ТПВ України, складає 13,1—15,9 МДж/кг, що відповідає 3 та 4 класам якості згідно з ДСТУ EN 15359:2018. При залученні цих палив в енергетику можна отримати щорічно близько 1900—2500 млн кВт·год. теплової та електричної енергії, або 2800—3800 млн кВт·год. теплової енергії. Потенціал заміщення природного газу при цьому 1,0—1,3 млрд м³, вугілля — 1,6—2,2 млн тонн.

Література

Гапонич, Л. С., Голенко, І. Л., Топал, О. І. (2019). Нормативне регулювання, сучасний стан поводження та перспективи енергетичного використання твердих побутових відходів в Україні. *Проблеми загальної енергетики*, (58), 45—54. <https://doi.org/10.15407/page2019.03.045>.

Гапонич, Л. С., Голенко, І. Л., Топал, О. І. (2020). Перспективи використання SRF та RDF на цементних заводах України. *Екологічні науки*, (30), 92—97. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.15>.

Гелегуха, Г. Г., Жовмір, М. М., Олійник, С. М., Радченко, С. В. (2011). Біомаса як паливна сировина. *Промышленная теплотехника*, (33), 76—84. Взято з <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60379>.

Каратєєва, О. І., Коваль, О. А., Гроза, В. І. (2018). *Технологія переробки побутових відходів та відходів сільського господарства*. Миколаїв: МНАУ. Взято з <http://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/4379>.

Кобзар, С. Г., Топал, О. І., Гапонич, Л. С., Голенко, І. Л. (2020). Моделювання процесу сумісного спалювання природного газу з паливами із твердих побутових відходів. *Електронне моделювання*, (42), 74—92. <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.072>.

Петрук, В. Г., Васильківський, І. В., Іщенко, В. А., Петрук Р. В. (2013). *Управління та поводження з відходами. Частина 3. Полігони твердих побутових відходів*. Вінниця: ВНТУ. Взято з https://www.researchgate.net/publication/276830967_Upravlinna_ta_povodzenna_z_vidhodami_C3_Poligoni_tverdih_pobutovih_vidhodiv.

Шекель О. Й. *Схема санітарного очищення м. Києва. ТОМ 2 «Технологічна частина поводження з відходами»*. (2011). Київ: ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства». Взято з <http://golos.kievcity.gov.ua/files/2014/6/19/TOM-2.pdf>.

Astrup, T., Moller, J., Fruergaard, T. (2009). Incineration and co-combustion of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, (27), 789—799. <https://doi.org/10.1177/0734242X09343774>.

Boavida, D., Abelha, P., Gulyurtlu, I., Cabrita I. (2003). Co-combustion of coal and nonrecyclable paper and plastic waste in a fluidized bed reactor. *Fuel*, (82), 1931—1938. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00151-0](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00151-0).

Budihardjo, M. A., Yohana, E., Ramadan, B. S., Puspita, A. S., Adhana, S. N., Rizkiana, J. N. (2022). Study of Potential Refuse Derived Fuels as Renewable Alternative Energy from a Jatibarang Landfill. *Polish Journal of Environmental Studies*. <https://doi.org/10.15244/pjoes/145614>.

Haponych, L., Golenko, I., Topal, A. (2019). *Current status of municipal solid waste management in Ukraine*, Proceedings of 2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: June 24–28th, Lviv, Ukraine. Lviv: Lviv Polytechnic National University. <https://doi.org/10.23939/cte2019.01.291>.

Kaza, S., Yao L., Bhada-Tata, P. & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development Series*. Washington: DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>. Взято з <https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/978-1-4648-1329-0>.

Komilis, D., Evangelou, A., Giannakis, G., Lymperis, C. (2012). Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. *Waste Management*, (32), 372—381. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.034>.

Lin, H., Ma, X. (2012). Simulation of co-incineration of sewage sludge with municipal solid waste in a grate furnace incinerator. *Waste Management*, (32), 561—567. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.032>.

Mutz, D., Hengevoss, D., Hugl, C., & Gross, T. (2017). *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management. A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries*. Eschborn: GIZ GmbH. Взято з https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf.

Neuwahl, F., Cusano, G., Benavides, J. G., Holbrook, S. & Roudier, S. (2019). *Best Available Techniques (BAT). Reference Document for Waste Incineration*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI: 10.2760/761437. Взято з <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC118637>.

Rada, E. C., Cioca, L.-I., Lonescu, G. (2017). *Energy recovery from Municipal Solid Waste in EU: proposals to assess the management performance under a circular economy perspective*. MATEC Web of Conferences 121, 05006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712105006>.

Reimann, D. O. (2012). *CEWEP Energy Report III (Status 2007–2010). Results of Specific Data for Energy, RI Plant Efficiency Factor and NCV of 314 European Waste-to-Energy (WiE) Plants*. Germany: Confederation of European Waste to Energy Plants (CEWEP). Взято з https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/10/1069_13_01_15_cekewep_energy_report_iii.pdf.

Saveyn, H., Eder, P., Ramsay, M., Thonier, G., Warren, & K., Hestin, M. (2016). Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy. EUR 28230 EN. <https://data.europa.eu/doi/10.2791/870953>.

Wilson, S., Symon, C. (2019). *Technical Background Report for the Global Mercury Assessment, 2018*. AMAP/UN Environment. Взято з <https://www.amap.no/documents/doc/technical-background-report-for-the-global-mercury-assessment-2018/1815>.

Themelis, N., Barriga, M., Estevez, P., & Velasco, M. (2013). *Guidebook for the Application of Waste to Energy Technologies in Latin America and the Caribbean*. WTE Guidebook, EEC/IDB, Earth Engineering Center, Columbia University. Взято з <https://gwcouncil.org/wte-guidebook-for-latin-america-and-the-caribbean/>.

Weber, K., Quicker, P., Hanewinkel, J. (2020). Status of waste-to-energy in Germany, Part I — Waste treatment facilities. *Waste Management & Research*, (38), 23—44. <https://doi.org/10.1177/0734242X19894632>.

Stefano Cernuschi, S., Grosso, M., Viganò, F., Zanetti, M., Panepinto, D., Ragazzi, M. & Lombardi, F. (2020). *White Paper on Municipal Waste Management*. Milano: Utilitalia. Взято з <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2021/03/WHITE-PAPER-DEFINITIVO-2-24-febbraio-2021.pdf>.