

УДК 628.4.08

**Ihor Satin**<sup>1,2</sup>, PhD, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture, Acting deputy director, Scientific, Research, Design and Technology Institute of Municipal Economy, State Enterprise

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2028-9791> *e-mail*: [satin@nikti.org.ua](mailto:satin@nikti.org.ua)

**Tetyana Romanova**<sup>2</sup>, PhD, Head of the Laboratory

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-8270> *e-mail*: [romanova@nikti.org.ua](mailto:romanova@nikti.org.ua)

**Olena Panchenko**<sup>2</sup>, Head of the Laboratory

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3680-7036> *e-mail*: [panchenko@nikti.org.ua](mailto:panchenko@nikti.org.ua)

<sup>1</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Scientific, Research, Design and Technology Institute of Municipal Economy, State Enterprise, Kyiv, Ukraine

## **IMPROVEMENT OF MECHANICAL AND BIOLOGICAL TREATMENT TECHNOLOGIES ACCORDING TO THE MORPHOLOGICAL AND FRACTIONAL COMPOSITION OF HOUSEHOLD WASTE**

**Abstract.** *Achieving the goals of reducing the volume of municipal waste disposal by 30% by 2030, as established by the National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030, may become feasible following the establishment of municipal waste management infrastructure.*

*The results of the research on the morphological composition of municipal waste are utilized in waste management sector planning, estimating the expected biogas quantity at municipal waste landfills, determining the amount of heat that can be harnessed from the incineration of municipal waste. The research also highlights the impact of waste composition on the completeness and capacity of waste sorting lines and its influence on the cost of construction and maintenance.*

*The material balance exerts the most significant influence on the technical and economic indicators of waste sorting enterprises, including mechanical-biological treatment facilities. Material balance calculations are carried out based on the morphological and fractional composition of municipal waste.*

*This article presents the results of research into the morphological composition of municipal waste generated in the populated areas of the Sumy urban territorial community. Additionally, findings regarding the fractional composition of municipal waste generated in the city of Kyiv are provided. Based on the results of the morphological and fractional composition research, material balances for municipal waste were calculated, using a simplified technological scheme for mechanical-biological treatment as an illustrative example.*

**Key words:** *municipal solid waste management, municipal solid waste, municipal solid waste collection, transportation, recovery, disposal, mixed municipal solid waste, material balance, mechanical-biological treatment, morphological composition, fractional composition.*

І.В. Сатін<sup>1,2</sup>, Т.І. Романова<sup>2</sup>, О.С. Панченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства», м. Київ, Україна

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МЕХАНІКО-БІОЛОГІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗА МОРФОЛОГІЧНИМ ТА ФРАКЦІЙНИМ СКЛАДОМ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

***Анотація.** Досягнення цілей зі зменшення обсягу захоронення побутових відходів до 30% у 2030 році, які встановлені Національною стратегією управління відходами в Україні до 2030 року, можливо після створення інфраструктури управління побутовими відходами.*

*Результати дослідження морфологічного складу побутових відходів використовують при плануванні сектору управління відходами, для визначення очікуваної кількості біогазу на полігонах побутових відходів, для визначення кількості теплоти, яка може бути відведена при спалюванні побутових відходів, а також відмічаються вплив складу відходів на комплектність та потужність сміттесортувальних ліній, вплив на вартість будівельних робіт та обслуговування.*

*Найбільший вплив на техніко-економічні показники сміттесортувальних підприємств, в тому числі установок механіко-біологічної обробки, має матеріальний баланс. Розрахунки матеріального балансу виконують на основі морфологічного та фракційного складу побутових відходів.*

*У статті наведено результати досліджень морфологічного складу побутових відходів, які утворюються в населених пунктах Сумської міської територіальної громади. Наведено результати досліджень фракційного складу побутових відходів, які утворюються в місті Київ. На основі результатів досліджень морфологічного та фракційного складу було розраховано матеріальний баланс побутових відходів на прикладі спрощеної технологічної схеми механіко-біологічного оброблення.*

***Ключові слова:** управління побутовими відходами, побутові відходи, збирання, перевезення, відновлення, видалення, змішані побутові відходи, матеріальний баланс, механіко-біологічне оброблення, морфологічний склад, фракційний склад.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.64-77>

### Вступ

**Постановка завдання.** За оцінкою Мінінфраструктури, в Україні за 2022 рік утворилось понад 39 млн м<sup>3</sup> побутових відходів, або понад 7 млн т, які захоронюються на 5,7 тис. сміттєзвалищ і полігонів загальною площею майже 8 тис. га [1]. Тільки 80% населення України охоплено послугами з вивезення побутових відходів. В Україні побудовано 34 сміттесортувальні лінії, діє один сміттєспалювальний завод (завод «Енергія», м. Київ) та три сміттєспалювальні установи. Загалом в Україні перероблено та утилізовано близько 9,9% побутових відходів, з них: 1,66% спалено, а 8,24% побутових відходів потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні лінії [1].

Кількість перевантажених сміттєзвалищ становить 163 од. (2,8%), а 693 од. (12,0%) не відповідають нормам екологічної безпеки. З 2 197 сміттєзвалищ, які потребують рекультивациі, фактично рекультивовано тільки 258 одиниць [1].

Таким чином, тільки 9,9% побутових відходів відновлюються, а 90,1% відходів захоронюють на полігонах та сміттєзвалищах. Домінуючим способом поводження з побутовими відходами залишається їх захоронення на полігонах та сміттєзвалищах. Внаслідок відсутності дієвої системи поводження з побутовими відходами щороку утворюється понад 27 тис. несанкціонованих сміттєзвалищ [2].

За оцінками RNDА, сектор управління побутовими відходами зазнав значної шкоди внаслідок бойових дій [3]. За оцінками RNDА, загальна сума завданої шкоди станом на серпень 2022 року становить 95 млн доларів США. Знищено 5% від всього парку сміттєвозів України, 9% сортувальних ліній та 17% біогазових установок, що спричинило збій в роботі сектору та матиме довготривалі екологічні наслідки [3]. Особливої шкоди зазнали Луганська та Донецька області.

В той же час, з набуттям чинності Закону України «Про управління відходами» сектор управління побутовими відходами наближається до вимог ЄС у правовому підґрунті [4]. За цільовими показниками, які встановлені в Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року [2], збільшення обсягів відновлення відходів можливо забезпечити за рахунок створення об'єктів інфраструктури з оброблення побутових відходів. Ефективність та технологічна схема нових об'єктів з оброблення відходів суттєво залежить від багатьох чинників, серед яких склад та характеристики побутових відходів в населених пунктах, з яких передбачається вивезення відходів для оброблення. Так, відповідно до вимог ГБН В.2.2-35077234-001 розрахунки кількості та параметрів основних технологічних вузлів, обладнання та об'ємно-планувальних рішень залежать від обсягів та складу побутових відходів, що надходять на підприємство [5]. Техніко-економічні показники майбутнього об'єкта оброблення залежать від розрахунків або припущень про морфологічний склад побутових відходів та його динаміку протягом року.

Робота виконується в рамках реалізації Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 820-р від 8 листопада 2017 року.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під час проектування об'єктів оброблення побутових відходів, з метою встановлення техніко-економічних показників, необхідно отримання інформації про склад та обсяги утворення побутових відходів, що зазначено у вимогах ГБН В.2.2-35077234-001 та ДБН А.2.2-3:2014 [5, 6].

В посібнику колективу науковців та фахівців – Барінов М.О., Олексієвець І.Л., Родная Д.В. та інші – приділено увагу практичним аспектам управління відходами та визначено умови використання морфологічного складу. Авторами зазначається необхідність дослідження морфологічного складу на етапі планування системи управління відходами, вплив складу відходів на комплектність та потужність сміттесортувальної лінії, зазначено вплив на вартість будівельних робіт та обслуговування [7].

Дослідження морфологічного складу побутових відходів з метою визначення обсягів біогазу при рекультивациі полігонів побутових відходів та енергетичного потенціалу при спалюванні наведено у роботах [9–14]. Для визначення розрахункових обсягів біогазу важливою складовою є біорозкладна частина побутових відходів: харчові відходи рослинного та

тваринного походження, відходи зелених насаджень, деякі види паперу та відходи деревини, тканини природного походження [9, 12, 13]. Визначення теплотворної здатності побутових відходів та розрахунок кількості теплоти, яку можна отримати від спалювання побутових відходів, здійснюються на основі даних про вологість та морфологічний склад побутових відходів [8]. В багатьох роботах зазначено, що саме біорозкладна частина побутових відходів підвищує вологість та знижує фактичну теплотворну здатність побутових відходів [15–17]. Особлива увага приділяється енергетичному потенціалу побутових відходів шляхом прямого спалювання або отриманням альтернативного палива RDF/SRF в роботах Сігала О., Саф'янца А., Павлюк Н. [15]. Авторами зазначається, що першочерговим джерелом інформації є визначення морфологічного складу відходів.

Застосування параметрів утворення, в тому числі і морфологічного складу побутових відходів, під час регіонального планування системи пропонують у своїх звітах експерти DESPRO [8].

Фракційна характеристика побутових відходів застосовується для більш детального визначення матеріального балансу для підприємств оброблення, відновлення або сортувальних ліній [20].

### **Методологія визначення морфологічного та фракційного складу побутових відходів**

Натурні дослідження з визначення морфологічного складу побутових відходів проводились з урахуванням наказу Міністерства з питань житлово-комунального господарства України від 16.02.10 р. №39 «Про затвердження Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів» та методології дослідження морфологічного складу побутових відходів SWA-Tool (Solid Waste Analysis Tool), яка була розроблена як частина проекту «Інструмент аналізу твердих відходів» Європейської комісії (SWA-Tool).

Дослідження морфологічного складу твердих побутових відходів проводились на господарській ділянці полігону міста Суми. Склад побутових відходів визначався шляхом натурних замірів окремих компонентів.

Під час дослідження побутових відходів, які надходять на полігон, виключено змішування твердих, великогабаритних, ремонтних, промислових та інших відходів.

До виконання дослідження з визначення морфологічного складу побутових відходів залучаються спеціально навчені, підготовлені та проінструктовані працівники (далі – сортувальники). Оптимальна кількість персоналу сортувальної бригади розраховується із середньої швидкості сортування відходів на рівні 6 людино-годин на 100 кілограмів відходів. Інструктаж з методів сортування, техніки безпеки та охорони праці проводиться до початку польових досліджень. Весь персонал, який бере участь у польових дослідженнях, має бути вакцинований від поліомієліту, гепатиту А та гепатиту В. Сортувальники забезпечуються спецодягом та засобами індивідуального захисту.

Сміттевоз вивантажується на майданчику з твердим покриттям. Із загального обсягу побутових відходів, що вивантажені зі сміттевоза, відбираються зразки орієнтовною вагою 150–170 кг.

Сортувальники збирають визначені за класифікацією компоненти побутових відходів у пластикові пакети або контейнери. Компоненти розділяються на складові за матеріалами або маркуванням. Компоненти очищуються від бруду та рідини. Рідини від харчових упаковок враховуються до складу біорозкладних компонентів. Для наповнення пакетів або контейнерів використовують лопати. Після закінчення відбору окремих компонентів у пакети завантажують залишок (фракція  $\leq 40$  мм), що не піддається сортуванню.

Проводиться почергове зважування компонентів побутових відходів у пластикових пакетах або контейнерах, а також залишку відходів (фракція  $\leq 40$  мм). Керівник групи сортувальників фіксує вагу для кожного типу матеріалу, відсортованого за визначеною класифікацією, переглядає форму, а потім заносить результати зважування у протокол. Після зважування заповнені зразки видаляють до ділянки складування полігону.

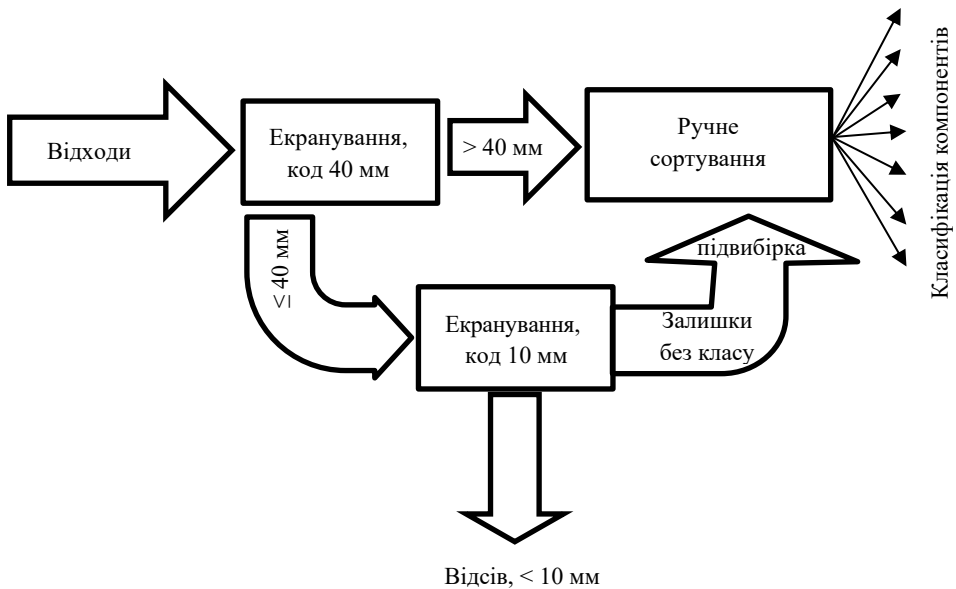


Рис. 1. Процедура сортування

Опрацювання результатів дослідження виконуються у наступному порядку:

- визначають масу кожного відсортованого компонента побутових відходів шляхом підсумовування відповідних даних зважування;
- визначають загальну масу зразка, що була відсортована, шляхом підсумовування усіх даних, одержаних в ході зважування компонентів та їх несортованого залишку (фракція від 10 до 40 мм);
- прийнявши за 100% масу побутових відходів всіх зразків, розраховують відсотковий вміст кожного компонента побутових відходів;
- за загальними даними з усіх зразків шляхом статистичного оброблення визначають похибку серії вимірювань;
- визначають середній морфологічний склад побутових відходів за сумарними показниками всіх зразків.

Відбір нових зразків для дослідження фракційного складу побутових відходів здійснювався аналогічно відбору зразків для досліджень морфологічного складу. Для визначення фракційного складу не використовувались зразки, які відсортовували для визначення морфологічного складу. При дослідженні зразків побутові відходи вручну просівались на семи спеціальних каскадних ситах з квадратними прохідними отворами наступними розмірами: 20x20; 40x40; 60x60; 80x80; 100x100; 150x150; 200x200; 250x250 мм. Розділені фракції зважувались і визначався їх відсотковий вміст за масою. Результати замірів оброблялись стандартними статистичними методами із визначенням показників точності, середніх значень та інтервальною оцінкою.

### **Визначення матеріального балансу установок механіко-біологічного оброблення побутових відходів**

Тверді побутові відходи (ТПВ), які утворюються в населених пунктах Сумської міської територіальної громади, характеризуються як гетерогенна суміш невизначеної кількості предметів, матеріалів, речовин з великим різноманіттям механічних, фізико-хімічних та інших властивостей. Склад цієї суміші є непередбачуваним і носить випадковий характер, оскільки до складу побутових відходів можуть потрапляти різноманітні матеріали, що використовуються в побуті та на виробництві, і водночас він є прогнозованим за основними складовими. Морфологічний склад побутових відходів залежить від містоутворюючих характеристик, пори року, соціально-економічних умов життя населення та його загальноосвітнього і культурного рівнів, рівня матеріального забезпечення, рівня благоустрою житла та побутових умов, технології пакувальних матеріалів і тари, технології та системи оптової та роздрібною торгівлі тощо.

Побутові відходи, які утворюються в населених пунктах Сумської міської територіальної громади, поділяються на три основні групи: змішані побутові відходи (від житлового сектору та невиробничої сфери – адміністративних установ та комерційних закладів); роздільно зібрана вторинна сировина; великогабаритні відходи (ВГВ) та будівельні відходи (БВ), які утворюються в процесі поточного ремонту житла мешканцями.

В таблиці 1 наведено результати натурних польових досліджень із визначення морфологічного складу побутових відходів, які проводили в період 2020–2021 роки на території полігону, розташованого на території с. Великий Бобрик (місце видалення відходів Сумської міської територіальної громади). Було відібрано 12 зразків загальною вагою 1 200 кг за один сезон.

До групи «Біовідходи» входять всі органічні компоненти, які здатні до біологічного розкладу, а саме: харчові відходи рослинного та нерослинного походження (залишки овочів, фруктів, хліб, крупи, сири, м'ясо, риба, корми для тварин та інші), садові та паркові відходи (квіти, трави, листя, бур'яни тощо) та інші відходи (кістки, фекалії тощо). За довідковими даними вологість біовідходів складає 70–90% (за масою). Наявність біовідходів у складі змішаних побутових відходів призводить до утворення фільтрату під час перевезення та захоронення відходів та стає джерелом утворення біогазу на полігоні ТПВ. Пікові зростання вмісту біовідходів протягом року спостерігаються в серпні, вересні та січні; протягом тижня – в суботу, неділю; а також в святкові дні.

До групи «Картон та папір» відносяться глянцеви́й папір, шпалери, газетний папір, фотопапір, мелований папір для копіювання, папір та картон для пакування, гофрована тара, книги, плакати, туалетний папір тощо. При цьому, більше половини об'єму картону та паперу забруднені біорозпадними харчовими відходами, маслами та насичені вологою.

Таблиця 1. Морфологічний склад побутових відходів, які утворюються у Сумській міській територіальній громаді

№	Назва морфологічної групи	Вміст компонентів за морфологічними групами (за масою), %, літній період
1	Біовідходи	44,29
2	Картон та папір	11,82
3	Полімери (пластик, пластмаси)	7,93
4	Скло та кераміка	14,92
5	Чорні та кольорові метали	0,87
6	Текстиль	3,98
7	Небезпечні відходи	3,28
8	Кістки, шкіра, гума	0,75
9	Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів (дрібне будівельне сміття, каміння, вуличний змет тощо)	5,94
10	Відходи електронного та електричного обладнання	1,40
11	Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів	4,82
<b>12</b>	<b>Разом</b>	<b>100,00</b>

До групи «Полімери (пластик та пластмаси)» відносяться наступні найбільш характерні компоненти: PET-пляшки (упаковка), HDPE-контейнери (упаковка), PP-пластик (упаковка) та композитний пластик (сендвіч-упаковка).

До групи «Скло та кераміка» відносяться наступні компоненти: скляні пляшки білі та прозорі; скляні пляшки кольорові; віконне скло; кераміка та інші види скла (термостійке скло, кришталь, лабораторне скло тощо).

До групи «Текстиль» відносяться взуття, текстиль, що не одягається, та одяг, в тому числі частини текстилю: нитки, мотузки, шнури тощо.

До групи «Метали» відносяться чорні та кольорові метали, в тому числі металева тара та упаковка.

До групи «Небезпечні відходи» відносяться наступні компоненти: залишки фарби, відходи транспортних засобів та їх обладнання, відпрацьовані масла, акумулятори, батареї та батарейки, змішані шкідливі побутові засоби (люмінесцентні лампи, ртутні термометри, ліки, шприци, уайт-спирит, фотохімія, клеї, садова та побутова хімія тощо).

До групи «Відходи електронного та електричного обладнання» відносяться велика та мала побутова техніка, комп'ютери та обладнання для телекомунікації, прилади, що містять електричне живлення, або частини цих приладів.

До групи «Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів» входять інертні матеріали, які не піддаються класифікації, та відсів (фракція менше ніж 10 мм).

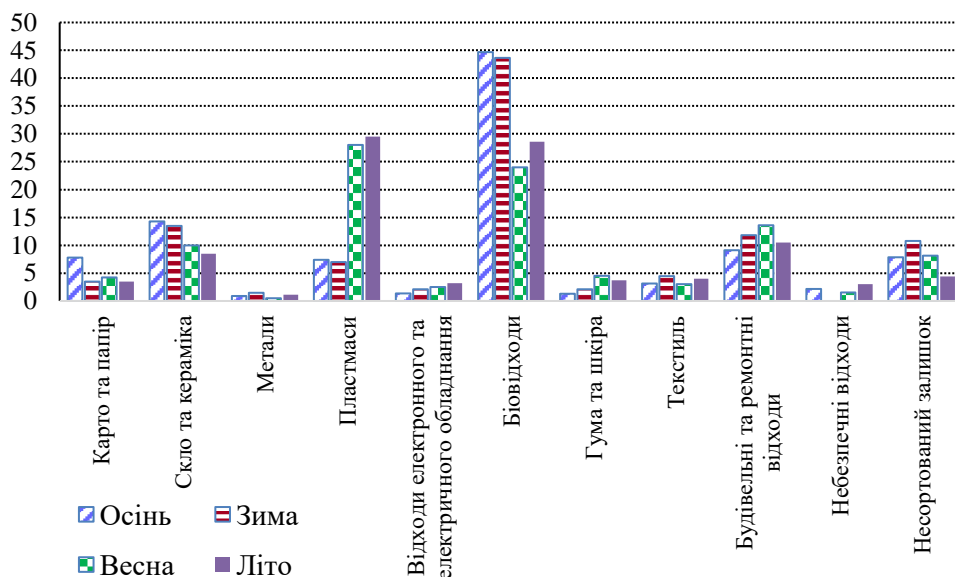


Рис. 2. Морфологічний склад (%) побутових відходів, що утворюються в населених пунктах Сумської області за 2020–2021 рр. (м. Конотоп, м. Шостка та м. Суми)

Динаміка зміни складових протягом року наведена на рис. 2. Так, значним коливанням за вмістом піддаються групи «Полімери», «Біовідходи», «Скло та кераміка» та «Картон та папір».

Фракційний склад побутових відходів, які утворюються в Києві, наведено в таблиці 2. Морфологічний склад відходів міста Київ подібний до складу побутових відходів, які утворюються в місті Суми. Тому застосуємо результати розподілу фракційного складу, визначеного в місті Київ, для результатів морфологічного складу, отриманого в населених пунктах Сумської області.

У наведеній таблиці слід звернути увагу на розподіл відсоткового вмісту за масою на каскадних ситах в сумі до 80 мм, від 80 до 250 мм та більше 250 мм. Ці розміри відповідають основним технологічним етапам на сортувальній лінії, а саме: а) розділення потоку відходів ключом 80 мм в циліндричному барабанному грохоті; б) ручне сортування (відбір вторинної сировини з фракцій більше 80 мм); в) інші автоматизовані процеси сепарації (виробництво RDF/SRF, відбір металів магнітними сепараторами тощо). Сума відсоткового вмісту фракцій до 80 мм (E5) відповідає масам, які розділяються в циліндричних барабанних грохотах «під екран», тобто це важка біорозкладна частина відходів, інертні компоненти тощо, що під дією сил гравітації переміщуються крізь отвори барабанного грохоту діаметром 80 мм. В даному випадку вміст фракції до 80 мм дорівнює 48,43%, з яких 43,48% (K5) – біовідходи та 4,95% (Ж5) – інертний залишок, в тому числі горючі компоненти. Вторинна сировина, яка міститься у фракції до 80 мм, складає 11,22% (D5), більш легка під час сепарації в циліндричному барабанному грохоті переважно залишається «над екраном».



Сума відсоткового вмісту фракцій від 80 до 250 мм (Г10) та більше 250 мм (Г11) відповідає масам, які піддаються ручному сортуванню на сортувальній лінії та подальшій аеробалістичній сепарації. Приблизно половину вторинної сировини при ручному процесі сортування буде відібрано (Г10 + Г11). В даному випадку приймаємо відбір тільки пластику на рівні 7,93% (табл. 1). Більш точно відсоток ручного відбору вторинної сировини можна визначити при визначенні морфологічного складу всіх компонентів вторинної сировини побутових відходів.

Після ручного сортування залишаються горючі компоненти (2Д-фракція для виробництва альтернативного палива RDF/SRF) та фракції більше 250 мм (3Д-фракція). Цей залишок становить приблизно 43,64% (враховано відбір вторинної сировини тільки 7,93% з наявних в таблиці 2).

Таблиця 2. Фракційний склад побутових відходів, які утворюються у Києві (2020 рік)

№ з/п	Розмір фракції, мм	Відсотковий вміст фракції (за масою)				
		Всього	в т.ч. вторсировини	в т.ч. залишок		
				всього	в т.ч. горючі компоненти (без вторсировини)	в т.ч. біовідходів
А	В	Г	Д	Е	Ж	К
1	менше 20	10,36	0,04	10,32	0,38	9,94
2	20...40	14,79	0,26	14,52	0,84	13,68
3	40...60	18,14	2,16	16,03	1,91	14,12
4	60...80	16,32	8,76	7,56	1,82	5,74
5	<b>Разом (до 80)</b>	<b>59,61</b>	<b>11,22</b>	<b>48,43</b>	<b>4,95</b>	<b>43,48</b>
6	80...100	14,78	11,25	3,52	2,01	1,51
7	100...150	10,11	8,87	1,23	0,47	0,76
8	150...200	3,79	3,79	-	-	-
9	200...250	3,56	3,56	-	-	-
10	<b>Разом (від 80 до 250)</b>	<b>32,24</b>	<b>27,47</b>	<b>4,75</b>	<b>2,48</b>	<b>2,27</b>
11	більше 250	8,17	8,17	-	-	-

Механіко-біологічні установки застосовуються до змішаних відходів, які мають високий вміст біовідходів. Змішані відходи піддаються механічним способам сортування, біологічним та ручному сортуванню. Основні концепції механіко-біологічного оброблення різняться між собою послідовністю технологічних операцій та варіантами біологічної обробки. При цьому виробляється висококалорійна фракція або стабілізовані органічні матеріали. Ручне сортування застосовується, якщо змішані відходи містять вторинну сировину, це, як правило, PET-пляшки. Блок ручного сортування може не застосовуватись при налагоджених системах роздільного збирання, якщо вміст вторинної сировини низький. Основними варіантами оброблення біовідходів є: а) компостування, з метою отримання технічного компосту; б) анаеробна ферментація з метою отримання біогазу; в) стабілізація, з метою отримання альтернативного палива.

Спрощена технологічна схема механіко-біологічного оброблення відходів з компостуванням та отриманням RDF/SRF показана на рис. 3. На схемі застосовано розподіл матеріального балансу за основними технологічними напрямками, який сформовано на основі результатів таблиці 2. Вся маса змішаних відходів поступає конвеєром в циліндричний барабанний грохот для екранування. За рахунок вільного просування відходів вздовж по циліндру та його обертів маса відходів розділяється на дві фракції – до 80 мм та більше 80 мм. При подальшому компостуванні також відбувається сепарація готового технічного компосту, при якій відокремлюється інертний відсів та спрямовується на полігон побутових відходів.



Рис. 3. Розподілення балансу відходів на установці механіко-біологічного оброблення

При ручному сортуванні (рис. 3) відбувається відбір кондиційної вторинної сировини (наприклад, забруднені маслом ПЕТ-пляшки або брудний картон не відбирають). Ефективність ручного сортування здебільшого залежить від організації збирання та перевезення побутових відходів. Наявність розвинутої мережі роздільного збирання вторинної сировини знижує ефективність ручного сортування на лініях. Вторинна сировина тюкується та передається на реалізацію для подальшого оброблення.

Після ручного сортування відходи поступають на балістичну аеросепарацію, де відокремлюються легкі горючі фракції (2Д-фракція) від важких матеріалів, таких як скlobій, каміння, метали, батарейки, великі за довжиною елементи (3Д-фракція) тощо. Метали та скlobій (табл. 1) спрямовуються як вторинна сировина для реалізації, а небезпечні відходи (табл. 1) підлягають передачі на ліцензовані підприємства для знешкодження. 3Д-фракцію та відсів спрямовують для видалення на полігон побутових відходів.

Таким чином, на основі морфологічного та фракційного складу побутових відходів ми визначили розподіл матеріального балансу побутових відходів на прикладі схеми механіко-біологічного оброблення з компостуванням біовідходів.

### **Висновки і перспективи подальших досліджень**

В Україні утворюються великі обсяги побутових відходів, які у 2022 році склали понад 39 млн куб. м або понад 7 млн т. Ця кількість відходів переважно захоронюється на сміттєзвалищах та полігонах. Для збільшення обсягів переробки побутових відходів в Україні необхідно створювати інфраструктуру для оброблення цих відходів. Ефективність таких об'єктів залежить від численних чинників, включаючи склад і характеристики відходів.

Результати дослідження морфологічного та фракційного складу побутових відходів є критично важливими для проектування нових об'єктів оброблення побутових відходів. Ця інформація впливає на техніко-економічні показники підприємства, ефективність виробничих процесів, розрахунок кількості біогазу або компосту та енергетичного потенціалу відходів, а також сприяє раціональному розподілу ресурсів при регіональному плануванні. При цьому важливим є здійснення досліджень морфологічного та фракційного складу побутових відходів за єдиними методичними підходами з прогнозованими величинами точності результатів.

Визначення морфологічного складу побутових відходів, що утворюються в населених пунктах Сумської області, відбувалось в період з 2020 по 2021 р. Для розрахунку матеріального балансу задіяні результати дослідження фракційного складу побутових відходів в Києві у 2020 році. За результатами аналізу розподілу відсоткового вмісту відходів за масою на різних фракціях (до 80 мм, від 80 до 250 мм, більше 250 мм), можна розрахувати кількість відходів, які спрямовуються на різні технологічні етапи оброблення. В дослідженнях акцентується увага на фракції до 80 мм, яка становить приблизно 48,43% та піддається біологічному обробленню, та фракції від 80 мм, яка піддається ручному та механічному сортуванню. На основі морфологічного складу відходів в дослідженнях зроблено припущення, що за допомогою ручного сортування відокремлюється вторинна сировина на рівні 7,93% за масою. Та за рахунок балістичної аеросепарації відокремлюється потенційне альтернативне паливо RDF/SRF, вміст якого складає приблизно 25%. Решта матеріалів у вигляді змету, інертних матеріалів підлягають видаленню на полігоні побутових відходів, а небезпечні відходи, відходи електронного та електричного обладнання підлягають вилученню та передачі ліцензованим підприємствам для знешкодження.

Подальші дослідження будуть спрямовані на побудову технологічних моделей та схем поводження з побутовими відходами з урахуванням п'ятиступеневої ієрархії управління побутовими відходами, за аналогією до існуючих у країнах ЄС. Важливо приділяти увагу цілісному опису схеми на кожному етапі, оскільки загальна ефективність і досяжність цілей Національної стратегії залежить від ефективності кожного етапу збирання, вивезення, оброблення та видалення.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналіз стану сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2022 рік. (б. д.). <https://mtu.gov.ua/news/34323.html>
2. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України № 820-р (2020) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-r#Text>
3. Швидка оцінка завданої шкоди та потреб на відновлення – серпень 2022. Київ : Світ. Банк, Уряд України, Європ. Коміс., 2022. 269 с. URL: <https://www.worldbank.org/uk/news/press-release/2023/03/23/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment> (дата звернення: 06.09.2023).
4. Про управління відходами : Закон України від 13.12.2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20/print> (дата звернення: 06.09.2023).
5. ГБН В.2.2-35077234-001:2011 Підприємства сортування та перероблення твердих побутових відходів. Вимоги до технологічного проектування.
6. ДБН А.2.2-3:2014 «Склад та зміст проектної документації на будівництво».
7. Практичні аспекти управління відходами в Україні. Посібник / [Барінов М.О., Олексієв І.Л., Родная Д.В., та ін.] – К. : «Поліграф плюс», 2021. – 118 с.
8. Лазненко Д. Визначення параметрів утворення побутових відходів у населених пунктах України для цілей регіонального планування. Київ : DESPRO, 2019. 9 с. URL: <http://surl.li/tdnz> (дата звернення: 06.09.2023).
9. Інтегроване управління та поводження з твердими побутовими відходами на Вінниччині [Текст] : монографія / під ред. В. Г. Петрука. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2007. – 160 с.
10. Атаєв, С. В. (2017). Дегазація Рівненського полігону твердих побутових відходів. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування* (1).
11. Dvalishvili, N. L., & Tabatadze, M. S. (2019). The influence of municipal solid waste of Georgia on climate changes. In *Waste Management and Resource Efficiency: Proceedings of 6th IconSWM 2016* (pp. 189-194). Springer Singapore.
12. Dimovski, B., Dimitrieska, C., Calamani, S., & Janevska, G. (2023). Mathematical Model for Assessment of Production and Energy Utilization of Landfill Gas in the Pelagonija Region in Republic of N. Macedonia (No. 10142). EasyChair.
13. Milosevic, L. T., Mihajlovic, E. R., Djordjevic, A. V., Protic, M. Z., & Ristic, D. P. (2018). Identification of Fire Hazards Due to Landfill Gas Generation and Emission. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(1).
14. Masebinu, S. O., Akinlabi, E. T., Muzenda, E., Aboyade, A. O., & Mbohwa, C. (2017). Assessing the morphological composition and energy potential of MSW, the case of the city of Johannesburg. In *Proceedings of international conference on industrial engineering and operation management (Morroco)*. IEOM Society International, USA (pp. 5696-5702).
15. Pavliuk, N., Sigal, O., Safiants, A., & Plashykhin, S. (2022). The use of residual municipal solid waste as an alternative fuel. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 15(4), 147-158.
16. Čepić, Z., Bošković, G., Ubavin, D., & Batinić, B. (2022). Waste-to-Energy in Transition Countries: Case Study of Belgrade (Serbia). *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(5).
17. Sideko, R. (2021). Application of technological processes to create a unitary model for energy recovery from municipal waste. *Energies*, 14(11), 3118.
18. Jędrzszak, A. (2018). Properties of the organic fraction directed to biostabilization in Mbt installations during the heating season. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 65-78.
19. Dronia, W., Połomka, J., & Jędrzszak, A. (2023). Morphological composition of bio-waste collected selectively in towns and villages during autumn and winter. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 73(4), 313-320.

20. Pitak, I., Denafas, G., & Lukošiušė, I. (2020). Analysis MSW fraction after separation with goal to have solid recovery fuel. In Linnaeus ECO-TECH'20: 12th International [digital] conference on establishment of cooperation between companies and institutions in the Nordic countries, the Baltic Sea region and the world 23–25 November 2020, Kalmar: book of abstracts. Linnaeus University.

*Стаття надійшла до редакції 14.02.2024 і прийнята до друку після рецензування 17.05.2024*

## REFERENCES

1. Stan sfery povodzhennja z pobutovymy vidhodamy v Ukraini za 2022 rik. (n. d.). Retrieved from <https://mtu.gov.ua/news/34323.html> [in Ukrainian].
2. Pro shvalennja Nacional'noi' strategii' upravlinnja vidhodamy v Ukraini do 2030 roku. Rozporjadzhennja Kabinetu Ministriv Ukrainy № 820-r (2020) (Ukrai'na). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-r#Text> [in Ukrainian].
3. Shvydka otsinka zavdanoi shkody ta potreb na vidnovlennia – serpen 2022. Kyiv : Cvit. Bank, Uriad Ukrainy, Yevrop. Komis., 2022. 269 s. Retrieved September, 06, 2023 from <https://www.worldbank.org/uk/news/press-release/2023/03/23/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment> [in Ukrainian].
4. Pro upravlinnia vidkhodamy: Zakon Ukrainy vid 13.12.2022 r. Retrieved September, 06, 2023 from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20/print> [in Ukrainian].
5. HBN V.2.2-35077234-001:2011 Pidpriemstva sortuvannia ta pereroblennia tverdykh pobutovykh vidkhodiv. Vymohy do tekhnolohichnoho proektuvannia [in Ukrainian].
6. DBN A.2.2-3:2014 «Sklad ta zmist proektnoi dokumentatsii na budivnytstvo» [in Ukrainian].
7. Barinov, M. O., Oleksiievets, I. L., Rodnaia, D. V. et al. (2021). Praktychni aspekty upravlinnia vidkhodamy v Ukraini [Practical aspects of waste management in Ukraine]. Kyiv: «Polihraf plius» [in Ukrainian].
8. Laznenko, D. (2019). Vyznachennia parametriv utvorennia pobutovykh vidkhodiv u naselenykh punktakh Ukrainy dlia tsilei rehionalnogo planuvannia [Determining the parameters of household waste generation in the settlements of Ukraine for the purposes of regional planning]. Kyiv: DESPRO. Retrieved September, 06, 2023 from <http://surl.li/tdnz> [in Ukrainian].
9. Petruk, V. N. (Ed.). (2007). Intehrovane upravlinnia ta povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy na Vinnychchyni [Integrated management and handling of solid household waste in Vinnytsia region]: monohrafiia. Vinnytsia: Universum-Vinnytsia [in Ukrainian].
10. Ataiev, S. V. (2017). Dehazatsiia Rivnenskoho polihonu tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Degassing of the Rivne solid waste landfill]. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia*, (1) [in Ukrainian].
11. Dvalishvili, N. L., & Tabatadze, M. S. (2019). The influence of municipal solid waste of Georgia on climate changes. In *Waste Management and Resource Efficiency: Proceedings of 6th IconSWM 2016* (pp. 189-194). Springer Singapore.
12. Dimovski, B., Dimitrieska, C., Calamani, S., & Janevska, G. (2023). Mathematical Model for Assessment of Production and Energy Utilization of Landfill Gas in the Pelagonija Region in Republic of N. Macedonia (No. 10142). EasyChair.
13. Milosevic, L. T., Mihajlovic, E. R., Djordjevic, A. V., Protic, M. Z., & Ristic, D. P. (2018). Identification of Fire Hazards Due to Landfill Gas Generation and Emission. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(1).
14. Masebinu, S. O., Akinlabi, E. T., Muzenda, E., Aboyade, A. O., & Mbohwa, C. (2017). Assessing the morphological composition and energy potential of MSW, the case of the city of Johannesburg. In *Proceedings of international conference on industrial engineering and operation management (Morroco)*. IEOM Society International, USA (pp. 5696-5702).

15. Pavliuk, N., Sigal, O., Safiants, A., & Plashykhin, S. (2022). The use of residual municipal solid waste as an alternative fuel. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 15(4), 147-158.
16. Ćepić, Z., Bošković, G., Ubavin, D., & Batinić, B. (2022). Waste-to-Energy in Transition Countries: Case Study of Belgrade (Serbia). *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(5).
17. Sidelko, R. (2021). Application of technological processes to create a unitary model for energy recovery from municipal waste. *Energies*, 14(11), 3118.
18. Jędrzszak, A. (2018). Properties of the organic fraction directed to biostabilization in Mbt installations during the heating season. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 65-78.
19. Dronia, W., Połomka, J., & Jędrzszak, A. (2023). Morphological composition of bio-waste collected selectively in towns and villages during autumn and winter. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 73(4), 313-320.
20. Pitak, I., Denafas, G., & Lukošiuūtė, I. (2020). Analysis MSW fraction after separation with goal to have solid recovery fuel. In *Linnaeus ECO-TECH'20: 12th International [digital] conference on establishment of cooperation between companies and institutions in the Nordic countries, the Baltic Sea region and the world*. 23–25 November 2020, Kalmar: book of abstracts. Linnaeus University.

*The article was received 14.02.2024 and was accepted after revision 17.05.2024*

**Сатін Ігор Валентинович**

канд. техн. наук, доцент Київського національного університету будівництва і архітектури, т.в.о. заступника директора Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

**Адреса робоча:** вул. Митрополита В. Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2028-9791> **e-mail:** [satin@nikti.org.ua](mailto:satin@nikti.org.ua)

**Романова Тетяна Іванівна**

канд. техн. наук, завідувач лабораторії Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

**Адреса робоча:** вул. Митрополита В. Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-8270> **e-mail:** [romanova@nikti.org.ua](mailto:romanova@nikti.org.ua)

**Панченко Олена Сергіївна**

завідувач лабораторії Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

**Адреса робоча:** вул. Митрополита В. Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3680-7036> **e-mail:** [panchenko@nikti.org.ua](mailto:panchenko@nikti.org.ua)