МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГОРБАЧОВА ОЛЕНА СЕРГІЇВНА

УДК 504.064.4: 628.4.04

ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

Спеціальність 101 – «Екологія»

Галузь знань 10 – «Природничі науки»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____О.С. Горбачова

Науковий керівник (консультант): ПАВЛЮХ Леся Іванівна, доктор технічних наук, доцент

Київ 2025

АНОТАЦІЯ

Горбачова О.С. Розроблення технології утилізації органічних відходів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 «Екологія». – Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, 2025.

Дисертація присвячена розробленню технології утилізації органічних відходів, яка включає в себе інноваційні рішення задля забезпечення екологічної безпеки інфраструктури управління відходами. У дисертації досліджено сучасні методи та технології управління відходами, джерела їх утворення, вплив на довкілля. Передумови та джерела утворення відходів свідчать про зростаючий обсяг утворення побутових, промислових та сільськогосподарських відходів, зокрема біовідходів, що зумовлено урбанізацією, зростанням населення та змінами у споживчих звичках. Це створює значне навантаження на існуючі системи поводження з відходами. Система поводження з біовідходами в Україні перебуває на етапі становлення. Незважаючи на наявність нормативно-правової бази, існують суттєві проблеми з її реалізацією на практиці. Основними викликами є недостатній рівень інфраструктури, низька обізнаність населення та відсутність стимулів для сортування та переробки біовідходів.

У роботі також розглядаються правові механізми та європейські імперативи у сфері управління відходами, а також описана методологія теоретичних та експериментальних досліджень з метою вивчення закономірностей біодеградації відходів. Розроблена математична модель процесів рециклінгу біовідходів.

У дисертаційній роботі запропоновані практичні кейси застосування розробленої технології. Представлені перспективи використання технології утилізації органічних відходів, а також виконане техніко-економічне та екологічне обґрунтування запропонованої технології. Основна мета дослідження полягає у розробленні ефективних технологічних та управлінських рішень для

зменшення негативного впливу відходів на довкілля на прикладі харчових відходів.

У висновках представлені основні результати дослідження, які відповідають поставлених завданням та визначають перспективи подальших досліджень у сфері управління відходами.

Ключові слова: органічні відходи, утилізація, компостування, біогаз, раціональне використання ресурсів, екологічна безпека, сталий розвиток**.**

ANNOTATION

Horbachova O.S. Development of Recycling Technology of Organic Waste. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 101 "Ecology". – State Non-Profit Enterprise "State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the development of organic waste disposal technology, which includes innovative solutions to ensure the environmental safety of waste management infrastructure. The thesis examines modern methods and technologies of waste management, sources of waste generation, and environmental impact. The prerequisites and sources of waste generation indicate a growing volume of municipal, industrial and agricultural waste, including bio-waste, due to urbanisation, population growth and changes in consumer habits. This puts a significant strain on existing waste management systems. Ukraine's biowaste management system is still in its infancy. Despite the existence of a regulatory framework, there are significant problems with its implementation in practice. The main challenges are insufficient infrastructure, low public awareness and lack of incentives for sorting and recycling bio-waste.

The paper also discusses the legal mechanisms and European imperatives in the field of waste management, and describes the methodology of theoretical and experimental research to study the patterns of waste biodegradation. A mathematical model of bio-waste recycling processes has been developed.

The thesis offers practical cases of application of the developed technology. Prospects for the use of organic waste disposal technology are presented, as well as a feasibility and environmental study of the proposed technology. The main goal of the study is to develop effective technological and managerial solutions to reduce the negative impact of waste on the environment on the example of food waste.

The conclusions present the main results of the study, which meet the objectives and determine the prospects for further research in the field of waste management.

Keywords: Organic Waste, Recycling, Composting, Biogas, Rational Use of Resource, Environmental Safety, Sustainable Development.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Перелік наукових праць за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача

1. Pavliukh L.I., Syrotina I.O., **Todorovych O**. Strategy of exhaust municipal waste landfill recultivation. Proceedings of the National Aviation University. 2020. Vol. 82, No 1. DOI: https://doi.org/10.18372/2306-1472.82.14613. URL: https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/visnik/article/view/14613 (0,5 авт. арк.).

Особистий внесок автора полягає у проведенні детального аналізу існуючих технологій рекультивації полігонів для визначення їх ефективності та можливостей застосування, розробці нової методології для рекультивації виснажених полігонів, яка включає сучасні підходи до управління відходами,

Особистий внесок співавтора Pavliukh L.I.. полягає у розробці нової методології рекультивації, збір та обробка експериментальних даних, наукового керівництва процесом підготовки статті.

Особистий внесок співавтора Syrotina I.O. полягає у літературному огляді існуючих технологій рекультивації, підготовка розділу "Висновки", проведенні досліджень для оцінки ефективності запропонованої методології.

2. Pavliukh L., Lialuk N., **Horbachova O**. Assessment of biofuel production technologies from microalgae and organic waste. Science-based technologies. 2022. Vol. 54, No 5. DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.54.16753. URL: https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/view/16753 (0,5 авт. арк.).

Особистий внесок автора полягає у проведенні детального аналізу існуючих технологій виробництва біопалива з органічних відходів, визначенні оптимальних умов виробництва біопалива.

Особистий внесок співавтора Pavliukh L. полягає у підготовці тексту статті, включаючи опис методів, результатів та висновків дослідження, наукового керівництва процесом підготовки статті.

Особистий внесок співавтора Lialuk N. полягає у проведенні експериментальних досліджень з виробництва біопалива з мікроводоростей, статистичній обробці отриманих даних.

3. Shamanskyi S., Pavliukh L., Repeta V., **Horbachova O.** Analysis of concentrations of biogenic compounds discharged into water bodies with municipal wastewater. Екологічна безпека та природокористування. 2022. Issue 44, No 4. DOI: https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.4.15-29. URL:

https://es-journal.in.ua/article/view/273550 (0,5 авт. арк.).

Особистий внесок автора полягає у аналізі всебічного впливу високих концентрацій біогенних сполук на якість води у поверхневих водоймах, аналізі нових методів моніторингу та оцінки забруднення води.

Особистий внесок співавтора Shamanskyi S. полягає у зборі та аналізі даних про концентрації біогенних сполук у стічних водах, аналізі нових методів моніторингу та оцінки забруднення води.

.Особистий внесок співавтора Pavliukh L. полягає у проведенні лабораторних досліджень з визначення концентрацій біогенних сполук. написанні тексту статті, що охоплює опис методів, отриманих результатів та висновків дослідження.

Особистий внесок співавтора Repeta V. полягає у розробці математичної моделі для прогнозування їх впливу.

4. **Горбачова О.С.**, Павлюх Л.І., Якименко Г.М. Модель ефективного управління відходами на прикладі супермаркетів. Екологічні науки. Випуск 4 (55), 2024. DOI:

https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.28. ISSN: 2306-9716. URL:

http://ecoj.dea.kiev.ua/4-55-2024 (0,5 авт. арк.).

Особистий внесок автора полягає у проведенні комплексного аналізу актуальних проблем управління відходами в українських містах, зокрема у супермаркетах, та пошуку шляхів їх вирішення, проведено детальне дослідження існуючих методів утилізації органічних відходів, зокрема компостування, та обґрунтовано їх ефективність, також розрахунок

економічної доцільності впровадження системи управління органічними відходами на основі компостування, що демонструє її вигідність як для муніципалітетів, так і для бізнесу.

Особистий внесок співавтора Павлюх Л.І. полягає у підготовці тексту статті, включаючи опис методів, отриманих результатів та висновків дослідження, а також підкреслив важливість залучення громадськості до процесу сортування та компостування відходів для підвищення екологічної свідомості населення.

Особистий внесок співавтора Якименко Г.М. полягає у економічному обґрунтуванні запропонованої моделі управління відходами, оцінка її соціального впливу.

5. Boichenko S. V., Pavliukh L., Shamansky S., Syrotina I., **Todorovych O.** Cascade Photobioreactor for Waste Water Treatment by Microalgae. Modern Management Review. 2020. Vol. XXV, No 27 (3). DOI: https://doi.prz.edu.pl/pl/pdf/zim/429. URL: https://doi.prz.edu.pl/pl/pdf/zim/429.

Особистий внесок автора полягає у проведенні детального аналізу існуючих технологій очищення стічних вод за допомогою мікроводоростей, аналізу нової методології для каскадного фотобіореактора, яка включає сучасні підходи до біологічного очищення води та участь в наукових дослідженнях та аналізі утилізації відходів технології.

Особистий внесок співавтора Boichenko S. V. полягає у загальному науковому керівництві дослідженням, аналізі експериментальних даних, перевіркою достовірності результатів, а також підготовкою висновків щодо можливостей масштабування запропонованої системи для промислового застосування.

Особистий внесок співавтора Pavliukh L. полягає у проведенні детального аналізу існуючих технологій біологічного очищення стічних вод із використанням мікроводоростей, виконанні експериментальних досліджень та оцінці ефективності запропонованої моделі.

Особистий внесок співавтора Shamansky S. полягає у здійснення аналізу росту мікроводоростей, проведенні наукових досліджень, підготовці графіків, і таблиць.

Особистий внесок співавтора Syrotina I. полягає у розробці нової методології каскадного фотобіореактора, що враховує сучасні підходи до водоочищення, аналізі екологічних аспектів впровадження фотобіореактора в міській системі водоочищення.

6. Nezbrytska I., Shamanskyi S., Pavliukh L., Gorbunova Z., Repeta V., **Horbachova O.** Removal of Biogenic Compounds from Sewage Water in a Culture of Euglena Gracilis (EUGLENOPHYTA). In: Boichenko, S., Zaporozhet, A., Yakovlieva, A., Shkilniuk, I. (eds) Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control. Springer, Cham., Vol 510. 2024. DOI:

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-44351-0_9. ISSN: 2198-4182. Included in Scopus, Q3.

Особистий внесок автора полягає у проведенні детального аналізу існуючих методів видалення біогенних сполук зі стічних вод за допомогою культури Euglena Gracilis, аналізу нової методології для ефективного видалення та утилізації біогенних сполук, яка включає сучасні підходи до біологічного очищення води, проведенні експериментальних досліджень для оцінки ефективності запропонованої методології на практиці.

Особистий внесок співавтора Nezbrytska I. полягає у здійсненні постановки наукового завдання та координування дослідницької роботи. провеленні аналізу сучасних біотехнологічних рішень для очищення стічних вод.

Особистий внесок співавтора Shamanskyi S. полягає у дослідженні екологічної доцільності використання Euglena gracilis для очищення води в міських умовах, підготовка розділу про перспективи впровадження методології на практиці.

Особистий внесок співавтора Pavliukh L. полягає у проведенні детального аналізу існуючих методів видалення біогенних сполук за допомогою культури

Euglena gracilis, розробка та тестування нової методологію біоочищення, виконанні експериментальних досліджень щодо її ефективності

Особистий внесок співавтора Gorbunova Z. полягає у здійсненні лабораторного супроводу досліджень, включаючи підбір культури Euglena gracilis та контроль за умовами її культивування.

Особистий внесок співавтора Repeta V. полягає у розробці математичного моделювання процесів біологічного очищення, опису динаміки зменшення концентрацій біогенних елементів у воді.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

7. Pavliukh L.I., **Horbachova O.S.,** Syrotina I.O., Reforestation of municipal waste landfill. Пермакультура та екологічно-безпечне землеробство: Міжнародна науково-практична конференція, Ужгород, Україна, 24-25 лютого 2018 р. .

8. **Horbachova O.S.,** Pavliukh L.I. Assessment of waste management treatment ways. Екологічна безпека держави: XII Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів, присвячена пам'яті професора Я.І. Мовчана, Київ, Україна, 19 квітня 2018 р.

9. Pavliukh L.I., **Horbachova O.S.,** Syrotina I.O., Methane from waste as fuel for motor vehicles. Science – Future of Lithuania' Transport Engineering and Management: XXI Conference for Junior Researchers. Vilnius, Lithuania, 4-5 May 2018.

10. **Horbachova Olena,** Pavliukh Lesia. Analysis of waste dealing in Ukraine in the world. Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: VI Міжнародна наукова конференція молодих вчених. Харків, Україна. 29-30 листопада 2018 р.

11. Padun Alla, Cherniak Larysa, Pavliukh Lesia, **Horbachova Olena**. Waste recycling on the paradigm of sustainable development. Modern directions of scientific research development: XII International Scientific and Practical Conference, Chicago, USA, May 18-20 2022

12. **Horbachova Olena**, Pavliukh Lesia. Modern technologies of organic waste management. Modern science: innovations and prospects: X International Scientific and Practical Conference. Stockholm, Sweden, 25-27 June 2022.

13. **Horbachova Olena**, Pavliukh Lesia. Evaluating the potential of dry compost as a sustainable packaging material. Innovative development of science, technology and education: VI International Scientific and Practical Conference, Vancouver, Canada, 14-16 March 2024.

ЗМІСТ

ВСТУП……12

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ……17

1.1. Передумови та джерела утворення відходів……17
1.2. Оцінка системи поводження з біовідходами в Україні……24
1.3. Інноваційні технологічні та управлінські рішення у сфері управління відходами……...41
Висновки до розділу 1……...…58

РОЗДІЛ 2. ПРАВОВІ МЕХАНІЗМИ ТА ЄВРОПЕЙСЬКІ ІМПЕРАТИВИ У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ ……..…..59
2.1. Ключові принципи управління відходами в країнах Європи…….59
2.2. Інтеграція у європейську систему управління відходами…….. 67
Висновки до розділу 2……...74

РОЗДІЛ 3. МЕТОДОЛОГІЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ……..75
3.1. Методологія теоретичного дослідження……..75
3.2. Методологія експериментального дослідження……..78
3.3. Математичне моделювання процесів утилізації органічних відходів……80
Висновки до розділу 3……..….89

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ…….90
4.1. Розроблення технології утилізації органічних відходів……..…90
4.2. Дослідження закономірностей процесів біорозкладу органічих відходів…109
4.3.Техніко-економічне та екологічне обґрунтування запропонованої технології……..112
Висновки до розділу 4……119
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНІ КЕЙСИ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ……...…120
5.1. Дослідження рішень управління кінцевого продукту технології ……...…120
5.2. Екологізація систем управління органічними відходами на різних рівнях.131
5.3. Практичні рекомендації щодо вдосконалення системи управління відходами……..153
Висновки до розділу 5……159
ВИСНОВКИ……...……..160
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ
ДОДАТКИ

ВСТУП

Актуальність теми. Проблема утилізації органічних відходів є однією з ключових у сфері екологічної безпеки та сталого розвитку. В умовах зростання обсягів побутових відходів, урбанізації та обмеженості природних ресурсів, питання ефективного управління органічною фракцією набуває особливої актуальності. За оцінками, органічні відходи становлять до 40–60% загального обсягу твердих побутових відходів в Україні, що створює значне навантаження на полігони та спричиняє викиди парникових газів, зокрема метану.

Традиційні методи утилізації, такі як захоронення або повільне компостування при низьких температурах, не забезпечують належного рівня санітарної безпеки, неефективні в умовах міського середовища та не відповідають сучасним екологічним стандартам. У цьому контексті особливої ваги набуває впровадження новітніх технологій, зокрема електричних компостерів, які дозволяють здійснювати швидку, контрольовану та безпечну переробку органіки в умовах побуту або малих підприємств.

Актуальність теми також зумовлена необхідністю адаптації національної системи управління відходами до вимог європейського законодавства. Водночас в Україні відсутні достатньо досліджені та апробовані технології швидкої утилізації органіки, які б відповідали як екологічним, так і соціально-економічним умовам.

Таким чином, розроблення ефективної технології утилізації органічних відходів із використанням електричного компостера є науково обґрунтованим, практично значущим і своєчасним завданням, що відповідає сучасним викликам у сфері екологічної політики, ресурсозбереження та інтеграції України до європейського екологічного простору.

Проблемами утилізації органічних відходів, задля підвищення рівня екологічної безпеки, займалися такі вітчизняні та зарубіжні вчені, як Петрук В.Г., Маркіна Л.М., Заклекта О. І., Мочук О. Б., Федевич Л.С., Чубка О.М., Івасюк Т.М., Бондаренко В.І., Тітенко Л.В., Лобода Н.С., Іванов О.П., Еріксон Корасеро,

Р.Б. Хуарес Гальєго, Крістін Джой Фраго, Руель Джозеф Гонзалес та інші. Їхні дослідження внесли вагомий вклад у розвиток технологій перероблення відходів, однак, незважаючи на їх вагомий внесок, існує ще багато невирішених питань та викликів, які потребують подальшого дослідження. Зокрема, це стосується ефективності та економічності технологій перероблення, зниження викидів парникових газів, утилізації специфічних видів органічних відходів, інтеграції нових технологій в існуючі системи управління відходами.

Отже, постає **науково-прикладне завдання** розроблення та впровадження інноваційних екологічно безпечних технологічних процесів утилізації органічних відходів, що забезпечують раціональне використання природних ресурсів, додержання нормативів шкідливих впливів на довкілля та забезпечення сталого розвитку.

Ідея роботи полягає у розробленні екологічно безпечної технології утилізації органічних відходів, орієнтованої на оптимізацію процесу перероблення органічних відходів у корисні продукти та енергію, що буде забезпечувати додаткові ресурси для вирішення потреб суспільства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проводились у межах науково-дослідної теми № 5-2022/10.02.03 кафедри екології Національного авіаційного університету «Розроблення технології утилізації твердих побутових та органічних відходів».

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає в розробленні ефективної екологічно безпечної технології утилізації органічних відходів, яка ґрунтуватиметься на забезпеченні ефективного використання органічних відходів з мінімальним негативним впливом на довкілля та максимальним забезпеченням корисних ресурсів для суспільства.

Завдання дослідження включають:

1. Проаналізувати технології управління відходами та оцінити обсяги утворення біовідходів в Україні.

2. Провести експериментальні дослідження задля встановлення закономірностей біорозкладу органічних відходів та дослідження оптимальних умов їх перероблення.

3. Розробити математичну модель рециклінгу органічних відходів.

4. Розробити технологію утилізації органічних відходів.

5. Розробити практичні рекомендації щодо вдосконалення програми управління відходами в Україні.

Об'єктом дослідження є утилізація органічних відходів.

Предметом дослідження є закономірності процесу біорозкладу органічних відходів в електричному компостері та властивості отриманого компосту.

Методи дослідження. У роботі використовувалися такі методи наукових досліджень: аналіз, синтез, статистичні, кореляційні, методи математичного моделювання, експериментальні, гравіметричні, порівняння та системний підхід.

Наукова новизна отриманих результатів. Дисертація розв’язує актуальне науково-прикладне завдання розроблення технології утилізації органічних відходів. Наукова новизна визначається наступними теоретичними та експериментальними результатами:

Уперше:

– досліджено та обґрунтовано механізми біорозкладу харчових відходів в електричному компостері, особливою рисою яких є отримання стерильного компосту, що дозволяє його подальше біологічно безпечне використання відповідно до принципів циркулярної економіки;

– запропоновано метод отримання нового типу біорозкладного паковання, особливою рисою якого є використання сухого компосту після термокомпостування на основі агар-агару, гліцерину та крохмалю, що дозволило подовжити термін зберігання продуктів без шкоди для довкілля;

Удосконалено:

– технологічний процес утилізації органічних відходів шляхом застосування електричного компостера з термоаеробним режимом, що

дозволили оптимізувати процес за рахунок скорочення часу, зменшення енергетичних витрат, викидів шкідливих речовин та зменшити масу відходів у 3–4 рази;

– математичну модель процесу дегідратації біовідходів у компостері шляхом використання методу найменших квадратів для визначення коефіцієнта дегідратації, що дозволяє прогнозувати втрату маси з точністю до ±5%.

– систему управління органічними відходами, яка поєднує багатофакторний моніторинг процесу компостування, що дозволило отримати готовий біокомпост за 4-5 годин;

Набуло подальшого розвитку:

– система управління органічними відходами на основі розроблених методів, технологій та моделей.

Практична значущість виконаного дисертаційного дослідження полягає в забезпеченні екологічно безпечної технології утилізації органічних відходів.

Розроблена технологія утилізації органічних відходів має значний потенціал зменшення негативного впливу на довкілля шляхом зменшення обсягу відходів та мінімізації викидів шкідливих речовин за рахунок застосування розробленого приладу утилізації органічних відходів. Оптимізація процесів утилізації дозволяє забезпечити економічність та енергоефективність виробничих процесів, що важливо в умовах обмежених ресурсів.

Результати дослідження впроваджені у навчальний процес ДУ “КАІ”, а саме для забезпечення викладання навчальних дисциплін: «Утилізація та рекуперація відходів» та «Адаптація до кліматичних змін», а також в роботу Звягельської міської ради та на комунальному підприємстві Звягельської міської ради «ЗВЯГЕЛЬСЕРВІС».

Особистий внесок здобувачки. Основні наукові положення, що містяться в дисертації, отримані здобувачкою самостійно. Теоретичне та експериментальне дослідження виконано особисто, а впровадження розробок у практику – за безпосередньої участі авторки.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних досліджень доповідалися та обговорювалися на: International research and practice conference «Problemy eksploatacji I diagnostyki: Пермакультура та екологічно-безпечне землеробство: Міжнародна науково-практична конференція (24-25 лютого 2018 р. Ужгород, Україна); Екологічна безпека держави: XII Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів, присвячена пам'яті професора Я.І. Мовчана (19 квітня 2018 р Київ, Україна); Science – Future of Lithuania' Transport Engineering and Management: XXI Conference for Junior Researchers (4-5 May 2018: Proceedings, Vilnius, Lithuania); Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: VI Міжнародна наукова конференція молодих вчених (29-30 листопада 2018 р., Харків, Україна); International research and practice conference «Problemy eksploatacji I diagnostyki: Systemy i srodki transportu samochodowego» (Жешув, Польща, 2019); XII International Scientific and Practical «Modern directions of scientific research development» (Chicago. USA, 2022); X International Scientific and Practical «Modern technologies of organic waste management» (Stockholm. Sweden, 2022); VI Міжнародна науково-практична конференція «Innovative development of science, technology and education» (Ванкувер, Канада, 2024).

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ТА ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ

1.1. Передумови та джерела утворення відходів

Утворення органічних відходів є невід'ємною частиною антропогенної діяльності, яка має значний вплив на екологічні системи. Органічні відходи включають широкий спектр матеріалів, що утворюються в результаті різних процесів, таких як сільське господарство, харчова промисловість, побутова діяльність та інші галузі. Ці відходи можуть бути як біологічного походження, так і синтетичними, що містять органічні компоненти. Джерелами утворення органічних відходів описані в табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Джерела утворення органічних відходів

Джерело утворення	Типи відходів
Сільське господарство	Залишки рослин, гній, відходи від переробки сільськогосподарської продукції, інші біологічні матеріали
Харчова промисловість	Залишки їжі, відходи від переробки харчових продуктів, упаковки, інші матеріали
Побутова діяльність	Залишки їжі, папір, картон, деревина, інші біологічні матеріали
Інші галузі	Відходи медицини, текстильної промисловості, деревообробки та інших галузей

Розуміння передумов та джерел утворення органічних відходів є ключовим для розробки ефективних стратегій їх управління та утилізації. Це дозволяє визначити оптимальні методи переробки та утилізації відходів, що сприяє зменшенню їх негативного впливу на довкілля та забезпечує сталий розвиток. Важливо враховувати специфіку кожного джерела утворення органічних

відходів та розробляти індивідуальні підходи до їх управління та утилізації, що дозволяє максимально ефективно використовувати ресурси та зменшити негативний вплив на довкілля.

Органічні відходи становлять одну з наймасштабніших фракцій у загальному обсязі твердих побутових відходів (ТПВ). За оцінками Світового банку, органічна фракція в ТПВ країн із середнім рівнем доходу (включно з Україною) становить від 45 до 55% від загального обсягу [1].

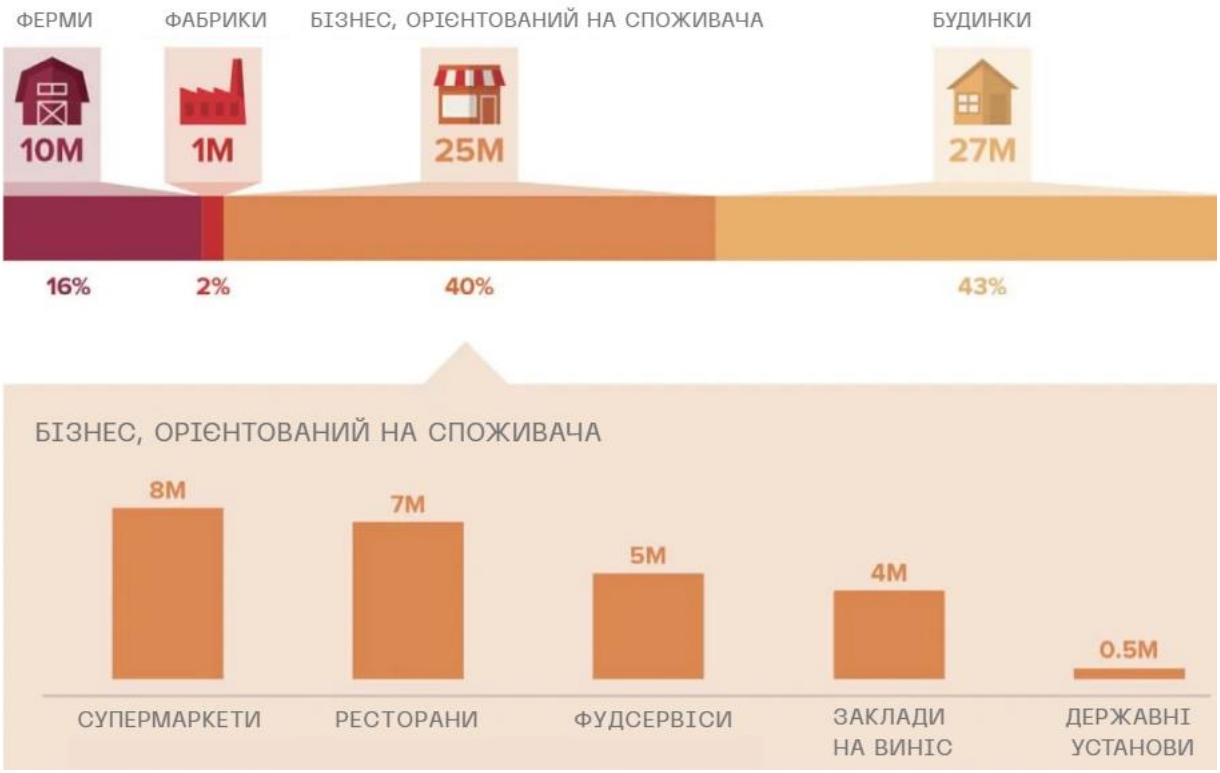


Рис.1.1. Розподіл харчових відходів [2]

Передумови утворення біовідходів:

1. Зміни в структурі споживання.

Ріст урбанізації та зростання доходів призводять до збільшення частки харчових продуктів, готових до споживання, що мають короткий термін зберігання та швидко втрачають товарний вигляд.

2. Відсутність ефективних систем роздільного збору.

Органіка часто змішується з іншими відходами, що ускладнює її перероблення та веде до втрати цінної біомаси.

3. Втрати в логістиці та на етапі продажу.

За даними Food and Argiculture Organization (FAO), щороку у світі втрачається понад 1,3 млрд тонн їжі, що еквівалентно приблизно третині всіх вироблених продуктів харчування. Це еквівалентно викидам парникових газів від приблизно 300 мільйонів автомобілів на дорозі протягом одного року [3] . Значна частина цих втрат стає джерелом органічних відходів.

4. Нерозвиненість інфраструктури для компостування.

Згідно з прогнозами Світового банку, до 2025 року міські жителі будуть генерувати приблизно 1.42 кг твердих побутових відходів на людину щодня, що значно більше порівняно з поточним показником у 0.64 кг [4].

У статті «Екологічні аспекти утилізації органічних відходів» О.Т. Мазурак [5] представлені результати досліджень щодо екологічних методів утилізації органічних відходів. У ній описані процеси, які призводять до утворення високотоксичних забруднювальних речовин, таких як діоксини, фурани та важкі метали, а також шляхи їх потрапляння у довкілля. Основними джерелами діоксинів у навколишньому середовищі є термічна утилізація відходів, виробництво хлорорганічних сполук, біогенні процеси під час компостування відходів, а також тривале зберігання хлорорганічних відходів у сховищах і на звалищах.

У статті «Управління харчовими відходами: огляд ділової практики роздрібних торговців та її наслідки для стійкої вартості» Луїза Меннінг [6] зазначено, що харчові відходи є глобальною проблемою, яка тісно пов’язана з продовольчою безпекою та управлінням ресурсами і має значні екологічні, соціальні та економічні наслідки. За оцінками, більше третини всієї їжі, виробленої у світі, викидається. Організація Об’єднаних Націй визнала цю проблему в Цілі сталого розвитку (ЦСР) 12 «Забезпечення моделей сталого споживання та виробництва». Ця ціль включає конкретну мету (12.3): до 2030 року вдвічі скоротити глобальні харчові відходи на душу населення на рівні роздрібної торгівлі та споживачів і зменшити втрати їжі вздовж ланцюгів виробництва та постачання [7].

Кількісні та якісні характеристики побутових відходів не є постійними і залежать від джерел їх утворення. Загалом до складу твердих побутових відходів входять типи, позначені на рис.1.2.

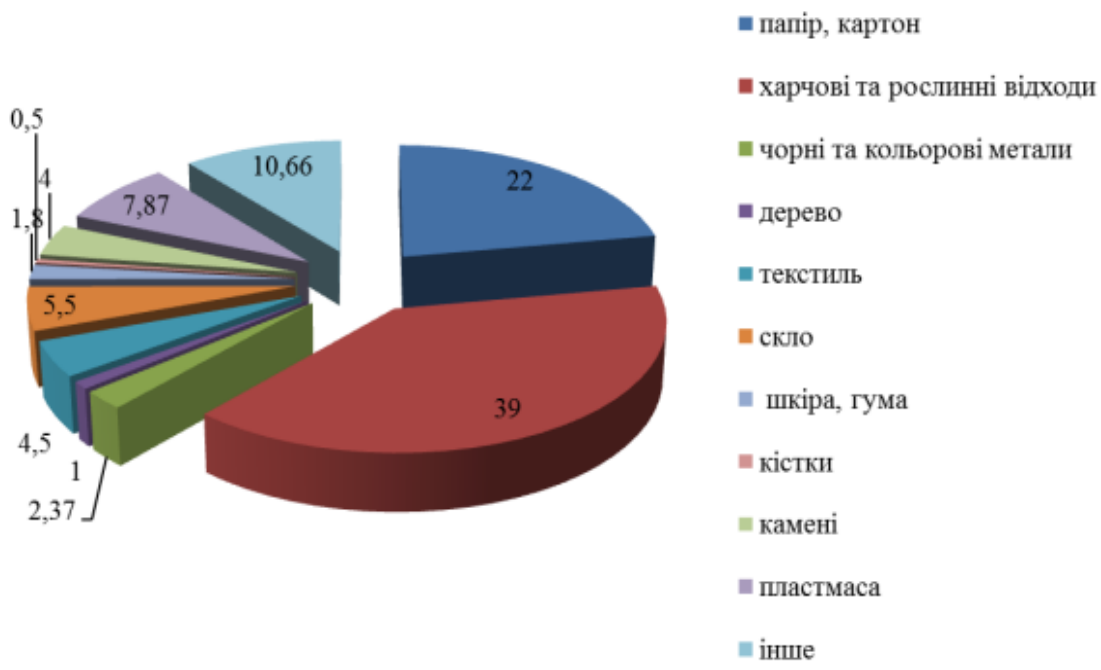


Рис.1.2. Морфологічний склад твердих побутових відходів [8]

Органічні відходи, що утворюються в результаті життєдіяльності людини, мають різноманітний морфологічний склад, який включає харчові залишки, сільськогосподарські відходи, папір, картон, деревину та інші біологічні матеріали. Кожен з цих компонентів має свої унікальні фізико-хімічні властивості, які впливають на процеси їх розкладання та утворення вторинних продуктів.

Однією з ключових характеристик органічних відходів є їх вологість, яка визначає швидкість біохімічних процесів. Високий вміст вологи сприяє активному розвитку мікроорганізмів, що прискорює процеси розкладання. Водночас, надмірна вологість може призвести до анаеробних умов, що сприяє утворенню метану та інших парникових газів.

Іншим важливим параметром є вміст органічного вуглецю, який є основним джерелом енергії для мікроорганізмів. Високий вміст органічного вуглецю сприяє інтенсивному розкладанню відходів, що призводить до

швидкого утворення компосту або біогазу. Однак, надмірна кількість вуглецю може призвести до утворення токсичних продуктів розкладання, таких як аміак та сірководень.

Також важливим є співвідношення вуглецю до азоту (C:N), яке визначає баланс поживних речовин для мікроорганізмів. Оптимальне співвідношення C:N забезпечує ефективний процес розкладання, тоді як відхилення від цього співвідношення може призвести до уповільнення процесів або утворення небажаних продуктів.

Таким чином, фізико-хімічні властивості органічних відходів відіграють ключову роль у процесах їх розкладання та утворення вторинних продуктів. Розуміння цих властивостей дозволяє оптимізувати процеси переробки відходів та зменшити їх негативний вплив на довкілля.

Накопичення органічної фракції у складі твердих побутових відходів, особливо за умови їх захоронення на полігонах, створює низку суттєвих екологічних загроз. Через високу вологість і швидку біологічну розкладність така фракція сприяє активному розвитку мікроорганізмів, що призводить до утворення фільтрату, неприємного запаху, залучення гризунів і патогенів. Ці процеси знижують санітарний стан територій, спричиняють загрозу поширення інфекційних захворювань і погіршення якості підземних вод.

Зокрема, саме органічні залишки є головним джерелом утворення полігонного фільтрату, який містить токсичні сполуки, залишки миючих засобів, органіку, важкі метали. Без належного очищення він може проникати у ґрунти й водоносні горизонти, порушуючи екологічну рівновагу.

Крім того, наявність великої кількості органіки в ТПВ є передумовою утворення парникових газів, зокрема метану, в умовах недостатньої аерації. Це створює не лише ризики вибухів і самозаймання на полігонах, а й робить сектор відходів одним із джерел антропогенного впливу на клімат.

Саме тому розуміння процесів розкладання органічної фракції та контролю за ними є ключовим для формування екологічно безпечних рішень у сфері поводження з ТПВ.

Аналіз фізико-хімічних властивостей органічних відходів показує, що середній вміст вологи в харчових відходах становить близько 70%, а в сільськогосподарських відходах – близько 60%. Вміст органічного вуглецю в харчових відходах становить приблизно 45%, тоді як у сільськогосподарських відходах – близько 40%. Співвідношення C:N в харчових відходах варіюється від 15:1 до 25:1, що є оптимальним для процесів компостування [9].

Процес розкладання органічних відходів та утворення метану

Органічні відходи, що потрапляють на сміттєзвалище, за відсутності доступу кисню піддаються анаеробному розкладанню. Цей процес здійснюється мікроорганізмами, які перетворюють складні органічні сполуки на простіші, виділяючи при цьому біогаз. Основними компонентами біогазу є метан (CH_4) і вуглекислий газ (CO_2).

Реакції анаеробного розкладання органічних речовин є складними і багатоступеневими. Загальна схема цього процесу може бути представлена наступним чином:

Складна органічна речовина + Вода → Метан + Вуглекислий газ + Інші гази

Більш детально процес анаеробного розкладання можна розділити на кілька стадій:

1. Гідроліз: Великі органічні молекули розщеплюються на більш прості сполуки (цукри, амінокислоти, жирні кислоти) під дією ферментів мікроорганізмів.
2. Ацидогенез: Продукти гідролізу перетворюються на леткі жирні кислоти, спирти та інші органічні кислоти.
3. Ацетогенез: Леткі жирні кислоти перетворюються на оцтову кислоту, водень і вуглекислий газ.
4. Метаногенез: Оцтова кислота, водень і вуглекислий газ перетворюються на метан і вуглекислий газ метаногенними археями.

Механізм самозаймання:

Метан, що виділяється в результаті анаеробного розкладання органічних речовин, є горючим газом. При певних умовах (висока концентрація метану,

наявність джерела запалювання) він може утворювати з повітря вибухонебезпечні суміші. Джерелом запалювання можуть бути як зовнішні фактори (блискавка, тління), так і внутрішні процеси, пов'язані з хімічними реакціями в масі відходів.

Окрім метану, в біогазі містяться й інші горючі гази, такі як водень і сірководень. Ці гази також можуть сприяти самозайманню. На ймовірність самозаймання органічних відходів впливають такі фактори:

Рис. 1.3. Фактори, що впливають на самозаймання

Самозаймання органічних відходів на сміттєзвалищах є складним процесом, який обумовлений взаємодією біологічних, хімічних і фізичних факторів. Метан, що виділяється в результаті анаеробного розкладання органічних речовин, відіграє ключову роль у цьому процесі. Для запобігання пожежам на сміттєзвалищах необхідно вживати заходів щодо зниження концентрації метану в біогазі, забезпечення ефективної вентиляції та попередження появи джерел запалювання.

1.2. Оцінка системи поводження з біовідходами в Україні

Система управління біовідходами в Україні перебуває на етапі трансформації, що зумовлено як внутрішніми екологічними викликами, так і зобов'язаннями перед міжнародними партнерами в межах євроінтеграційного курсу. Біовідходи, які становлять значну частку в морфологічному складі твердих побутових відходів (ТПВ), залишаються недостатньо охопленими системами роздільного збору та переробки. За даними Всеукраїнського дослідження понад 5 тисяч місць видалення відходів (МВВ) в Україні функціонують без належного інженерного облаштування, а більшість з них — це фактично легалізовані стихійні сміттєзвалища [10].

Основні проблеми системи:

- Недостатній рівень інфраструктури – більшість громад не мають компостувальних станцій або біогазових установок.
- Низький рівень охоплення роздільним збором – органічна фракція ТПВ здебільшого потрапляє на полігони разом з іншими відходами.
- Обмежене фінансування
- Відсутність системного моніторингу та контролю

Попри наявні труднощі, в Україні вже існують успішні приклади локального впровадження систем роздільного збору та переробки біовідходів. Ці приклади демонструють, що навіть за умов обмежених ресурсів громади можуть ефективно управляти органічною фракцією ТПВ. Для масштабування таких практик необхідне:

- посилення нормативного регулювання;
- фінансова підтримка з боку держави та міжнародних партнерів;
- підвищення екологічної свідомості населення;
- розвиток інфраструктури на місцевому рівні.

За звітом Zero Waste Europe (2025), що є комплексним оглядом стану реалізації підходів до нульових відходів у муніципалітетах Європи, у розділі, присвяченому Україні, акцент зроблено на перших кроках громад у

впровадженні системного підходу до управління біовідходами, зокрема через локальні ініціативи, освітні кампанії та пілотні проєкти.

Основні висновки щодо України:

Початковий етап системного впровадження – українські громади лише починають впроваджувати системи роздільного збору органічної фракції ТПВ. У більшості випадків це відбувається через пілотні ініціативи, підтримані міжнародними партнерами або громадськими організаціями.

Приклади з міст:

1. Хмельницький: місто бере участь у програмі Zero Waste Cities як кандидат. У межах проєкту впроваджено сортування біовідходів у школах і дитячих садках. Харчові залишки збираються окремо та надходять на компостування.

2. Львів: згадується як приклад міста, де вже діє централізована система збору органіки. Відходи з домогосподарств і бізнесу надходять на компостувальну станцію, де вони переробляються у добрива. Місто є одним із лідерів у впровадженні роздільного збору органіки.. Зібрана органіка транспортується на станцію компостування, де з неї виготовляють добрива для озеленення міста. На цій станції здійснюється переробка харчових відходів від населення та бізнесу, а також гілок і опалого листя, зібраних комунальними службами. Це перша в Україні станція такого типу, яка впроваджує централізовану систему збору та переробки органічних відходів. Зібрані органічні відходи розкладаються у довгі ряди (бурти), де відбувається процес компостування. Харчові та садові відходи змішуються у співвідношенні 3:2 для досягнення оптимального результату. Кожні 3-4 дні відходи в буртах перемішуються за допомогою спеціальної техніки — аераторів. Аератори зволожують та подрібнюють органічні матеріали, додають корисні мікробіофітобактерії та насичують відходи киснем. Це сприяє прискоренню процесу утворення компосту. Компостування супроводжується виділенням тепла, і температура в буртах підтримується на рівні 50-60 градусів [11].

3. Горохівська громада: приклад сільської громади, яка впровадила домашнє компостування через роздачу компостерів мешканцям приватного сектору.

Звіт підкреслює важливість освітніх кампаній, які супроводжують технічні рішення. Наприклад, у Хмельницькому та Києві (проєкт «Компола») навчальні заклади стали осередками формування культури компостування серед молоді.

Звіт демонструє, що навіть у складних умовах (зокрема, в умовах війни та обмежених ресурсів) українські громади здатні впроваджувати інноваційні підходи до управління біовідходами. Це свідчить про високий потенціал локальних ініціатив у формуванні національної політики у сфері циркулярної економіки. Дані звіту можуть бути використані як емпірична база для подальших досліджень ефективності локальних моделей управління органічними відходами [12].

Раціональне управління відходами є критично важливим для країн, які прагнуть забезпечити високий рівень життя для своїх громадян. В Україні економічний аспект довгий час не враховувався при формуванні державної стратегії поводження з відходами. Однак, втрачені економічні можливості є значними. За деякими оцінками, потенційний дохід від переробки паперу, металів, пластику, а також виробництва теплової та електричної енергії може перевищувати 100 млн євро на рік. Протягом останніх 20 років в Україні було прийнято низку законодавчих і нормативно-правових актів щодо поводження з відходами [13]. Їх метою є зменшення негативного впливу на довкілля та підвищення ефективності використання ресурсів та енергії. На жаль, ці законодавчі заходи не завжди повністю реалізуються на практиці.

Створення ефективної системи управління відходами потребує детального аналізу досвіду, зокрема, європейських країн, які адаптували свою законодавчу політику у сфері поводження з відходами відповідно до Директив ЄС. Директива ЄС [14] щодо захоронення відходів передбачає поступове зменшення обсягів розміщення біоорганічних відходів на звалищах і полігонах. В Україні ж здійснюється загальний збір та захоронення відходів. Окремі заходи щодо

роздільного збору не можуть забезпечити повне використання потенціалу біоорганічних відходів.

Система управління біовідходами в Україні є ключовим елементом загальної стратегії поводження з відходами, спрямованої на мінімізацію негативного впливу на довкілля та забезпечення сталого розвитку. Оцінка цієї системи включає аналіз існуючих методів збору, транспортування, переробки та утилізації біовідходів, а також визначення ефективності правових та організаційних механізмів, що регулюють ці процеси.

На сьогодні в Україні використовуються різні підходи до збору біовідходів, які залежать від регіону та типу населеного пункту. У великих містах впроваджуються системи роздільного збору відходів, що дозволяє виділяти біовідходи для подальшої переробки.

Таким чином, значний обсяг утворення органічних відходів, обмеженість ефективної інфраструктури для їх переробки та екологічні ризики, які виникають при неправильному поводженні з ними, створюють серйозні виклики для сучасного суспільства. Органічні відходи, такі як харчові залишки, сільськогосподарські відходи та інші біологічні матеріали, утворюються у великих кількостях як у міських, так і в сільських районах. Відсутність належної інфраструктури для їх збору, транспортування та переробки призводить до накопичення відходів на сміттєзвалищах, що спричиняє забруднення ґрунту, води та повітря, а також виділення парникових газів.

Неправильне поводження з органічними відходами може призвести до серйозних екологічних проблем, таких як забруднення підземних вод, утворення токсичних речовин та поширення хвороботворних мікроорганізмів. Крім того, органічні відходи, що розкладаються на сміттєзвалищах, виділяють метан – потужний парниковий газ, який сприяє глобальному потеплінню.

У зв'язку з цим, необхідність розробки інноваційних, локалізованих та сталих рішень для управління органічними відходами стає все більш актуальною. Технології, які дозволяють ефективно переробляти органічні відходи, зменшують їх негативний вплив на довкілля та сприяють раціональному

використанню ресурсів. Одним із таких рішень є технологія, запропонована в цій роботі. Запропонована технологія не лише сприяє зменшенню обсягу відходів, але й забезпечує екологічну безпеку та сталий розвиток, що є важливими аспектами сучасної екологічної політики. Впровадження таких рішень на локальному рівні дозволяє враховувати специфіку кожного регіону та забезпечувати ефективне управління відходами відповідно до місцевих умов та потреб.

Відповідно до Закону України «Про управління відходами» [15] управління з відходами – це дії, спрямовані на запобігання утворенню відходів, їх збирання, транспортування, сортування, зберігання, обробку, переробку, захоронення, знешкодження, включаючи контроль за цими операціями та нагляд за місцями вивезення.

Поводження з побутовими відходами в Україні здійснюється відповідно до державних норм і стандартів. Ці норми закріплені в законах України «Про житлово-комунальні послуги» [16], «Про управління відходами» [15] та «Про місцеве самоврядування в Україні» [17]. Механізм надання суб'єктам господарювання послуг з поводження з побутовими відходами у містах, селищах та селах незалежно від форми їх власності визначено Правилами надання послуг з поводження з побутовими відходами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 10 грудня 2008 р. № 1070 (зі змінами) [18], р зупинення м КМУ від 16.11.2011 р. № 1173 «Випуск І надання послуг з вивезення відходів» [19] , постанови КМУ України від 21.07.2005 № 631 «Про Порядок проведення конкурсу з надання житлово-комунальних послуг» [20] .

Станом на 2025 рік, інформація про поводження з побутовими відходами в Україні оновлена, і можуть бути внесені зміни до нормативно-правових актів. Ось актуалізована інформація на цей момент:

Закони України:

Закон України «Про житлово-комунальні послуги» від 24 червня 2004 р. № 1875-IV (зі змінами і доповненнями). Останні зміни до цього закону внесені Законом України від 5 липня 2022 року № 2322-IX [16].

Закон України «Про відходи» від 5 березня 1998 р. № 187/98-ВР (зі змінами і доповненнями). Останні зміни внесено Законом України від 6 липня 2022 року № 2338-IX. [21] І після на заміну вступив в дію Закон України «Про управління відходами» [15].

Закон України «Про місцеве самоврядування в Україні» від 21 травня 1997 р. № 280/97-ВР (зі змінами і доповненнями). Останні зміни внесено Законом України від 18 листопада 2021 року № 1919-IX [17].

Постачальник послуг з вивезення побутових відходів укладає зі споживачами договори про надання послуг у сфері поводження з такими відходами. Також він зобов'язаний укласти угоди з підприємствами, що займаються переробкою або захороненням побутових відходів, відповідно до вимог правил благоустрою, які формуються на основі схеми санітарного очищення населеного пункту. Такі договори повинні містити інформацію про чинні контракти з відповідними суб'єктами господарювання, які надають послуги з переробки або захоронення відходів.

Зміни в законодавстві: Будь-які оновлення до законодавчих або нормативно-правових актів, що стосуються організації конкурсів у сфері комунальних послуг, можуть впливати на процедуру. Тому слід регулярно перевіряти чинні редакції документів та нормативні зміни.

Закон України «Про публічні закупівлі» [22]: Відповідно до пункту 5 частини четвертої статті 2 цього Закону, його дія не поширюється на тендери з визначення виконавців послуг з вивезення побутових відходів. Це зумовлено тим, що у випадках, коли ціни на такі послуги затверджуються державними або іншими уповноваженими органами, Закон не застосовується — зокрема, якщо тарифи встановлюються через аукціон або інші механізми, визначені уповноваженими органами.

Поточний стан поводження з побутовими відходами в Україні

На сьогоднішній день щороку в Україні утворюється приблизно 54 мільйони кубометрів побутових відходів, що еквівалентно майже 9 мільйонам

тонн. Більшість цих відходів захоронюється на близько 6 тисячах звалищ та полігонів, які займають понад 9 тисяч гектарів території країни.

До недавнього часу економічні фактори не були визначальними у формуванні державної політики у сфері управління відходами. Проте через недосконале поводження з відходами країна щороку втрачає значну кількість вторинних ресурсів, які могли б бути перероблені або використані повторно. Частка вторинної сировини у структурі виробничих матеріалів залишається мізерною. Загальний обсяг накопичених в Україні промислових і побутових відходів досяг 15,6 мільярдів тонн. З початком повномасштабної війни ці показники зростають за рахунок відходів, утворених внаслідок руйнування інфраструктури внаслідок збройної агресії РФ [23].

У зв’язку з енергетичним дефіцитом, який відчуває Україна, актуальним є впровадження перетворення відходів на енергію — як це вже активно здійснюється в інших країнах світу. Для реалізації такого підходу необхідно створити відповідні умови та розвинути інфраструктуру. Наразі триває робота в цьому напрямі, а також спостерігається зацікавленість з боку органів місцевого самоврядування та бізнесу в реалізації подібних проектів. Вони очікують державної підтримки у формі стимулів і програм, над чим також ведеться робота [23].

Щодо організації роздільного збирання побутових відходів, то на прибудинкових територіях впроваджено відповідну систему. Така практика вже діє у 1462 населених пунктах, що на 50% більше, ніж у попередньому році. У 28 містах функціонують 34 сміттєсортувальні лінії, а в 17 ведеться будівництво сміттєсортувальних комплексів.

Попри це, наявні обсяги вторинної сировини, які надходять до підприємств переробки, не відповідають їх виробничим потужностям. Наприклад, щорічно на переробку надходить близько 100 тис. тонн паперово-картонних відходів, 160 тис. тонн полімерів, 50 тис. тонн ПЕТ-пляшок та 460 тис. тонн склобою. В Україні працюють 17 підприємств з переробки макулатури, 39 – полімерів, 19 – ПЕТФ-сировини та 16 – склобою. Водночас ресурсоцінні відходи, зібрані через

контейнери на прибудинкових територіях, сміттєсортувальні лінії та пункти прийому вторсировини, покривають лише 40% потреб наявних сміттєпереробних підприємств.

Через нестачу вітчизняної сировини, щороку в Україну імпортується близько 400 тисяч тонн вторинних ресурсів. Якби система роздільного збирання побутових відходів охоплювала всі населені пункти, потреби в імпорті такої сировини не виникало б [23].

Стан розвитку біогазових технологій на полігонах побутових відходів в Україні

Одним із важливих результатів впровадження систем збору біогазу стало скорочення об’ємів тіл полігонів. Зміни до Закону України «Про забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії», ухвалені у 2015 році [24], передбачили підвищення «зеленого» тарифу на електроенергію, вироблену з біомаси та біогазу, отриманого з побутових відходів. Це дало поштовх до активного впровадження таких систем на сміттєзвалищах в Україні.

Станом на сьогодні в країні діють когенераційні установки на 19 полігонах, де впроваджено системи вилучення біогазу. Ці установки забезпечують виробництво як електричної, так і теплової енергії. У 2019 році, за станом на 1 вересня, з таких полігонів було зібрано орієнтовно 7,385 млн м³ біогазу, а обсяг виробленої електроенергії перевищив 8,997 млн кВт·год.

Загальна встановлена потужність когенераційних установок на біогазі на кінець 2020 року становила приблизно 105 МВт, з яких 103,364 МВт виробляли електроенергію у межах механізму «зеленого» тарифу. Загальний обсяг виробленого біогазу за рік досяг 230 млн кубометрів [25].

На законодавчому рівні актуальним є питання закріплення обов’язку виробників фінансувати системи збору використаної продукції та її утилізації. Такий підхід сприятиме зменшенню обсягів відходів, що потрапляють на сміттєзвалища.

Основні напрямки державної політики у сфері поводження з відходами на найближчі роки визначає Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року [26].

Фізико-хімічні процеси відіграють ключову роль у розкладанні органічних відходів. Під впливом мікроорганізмів органічні речовини розкладаються на простіші сполуки, що призводить до утворення компосту або біогазу. Температура, вологість та аерація є основними факторами, що впливають на швидкість та ефективність цих процесів.

Таблиця 1.2

Вплив обробки ТПВ на навколишнє середовище

Середовище	Спосіб поводження з відходами		
	Роздільний збір	Використання сортувальних комплексів	Термічна обробка
Повітря	Мінімально можливий вплив залишкових несортованих відходів	Викиди пилу	Викиди CO, CO_2, SO_2, HCl, HF, NOx, важких металів, ароматичних вуглеводнів, діоксинів (під час піролізу викиди двох останніх відсутні)
Вода	Незначне забруднення матеріалів і речовин, які залишаються неасоційованими і відправляються на сміттєзвалище	Незначне забруднення матеріалів і речовин, що залишається неасоційованим і відправляється на сміттєзвалище. Стічні води, забруднені небезпечними речовинами, шкідливими мікроорганізмами (фільтрат)	Потенційне випадання частинок забруднюючих речовин у поверхневих водоймах; альдегіди та хлориди у воді від промивних газів
Грунт	Незначне забруднення матеріалів і речовин, які залишаються неасоційованими і відправляються на сміттєзвалище	Незначне забруднення матеріалів і речовин, які залишаються неасоційованими і відправляються на сміттєзвалище	Злом золи та шлаків, що містять важкі метали та інші небезпечні сполуки

З запропонованої таблиці видно, що найбільш екологічно прийнятним способом поводження з ТПВ є їх роздільний збір з подальшою утилізацією

відібраної вторинної сировини. А використання сміттєспалювальних комплексів – це найменш екологічно чисте поводження з ТПВ. Кожен із запропонованих способів поводження з ТПВ має різне співвідношення необхідної розумової та фізичної праці, а отже, забезпечує різний ступінь участі утворювача відходів. Крім того, кожен метод має різні капітальні та операційні витрати, що вимагає різного рівня фінансових зобов'язань як населення, так і місцевої влади. Вибір моделі поводження з ТПВ залежить також від наявності та повноти законодавства у цій сфері, а також від контролю за його виконанням. Вибір методу також може вплинути на метод стимулювання адаптації населення до обраної моделі поводження з відходами. Одним із головних завдань створення інтегрованої системи поводження з відходами є зниження ризику для здоров'я людей та забруднення навколишнього середовища [27]. Застосування органічних добрив, зокрема компосту, є основним засобом впливу людини на кругообіг елементів живлення у землеробстві. Він дає змогу не лише підтримувати, а й збільшувати його ємність шляхом поліпшення структури ґрунту (розпушення, збільшення доступу кисню); регулювання біохімічних процесів та активізації життєдіяльності корисних мікроорганізмів в ґрунті; створення родючого шару (гумусу); відновлення водного та повітряного режимів. Всі ці фактори направлені на підвищення кількісних та якісних показників сільськогосподарських культур. Внесення компосту на полях ТОВ «Агрофірми Корсунь» сприяло підвищенню урожайності різних польових культур від 6,2 до 15,6% (табл. 5.1).

Таблиця 1.3

Вплив компосту на урожайність сільськогосподарських культур

Контроль			Дослід			
площа, га	валовий збір, т	урожайність, ц/га	площа, га	валовий збір, т	урожайність, ц/га	Різниця
Озима пшениця, сорт «Достаток»						
40,0	1,54	38,4	40,0	1,78	44,4	+6,0 ц/га
Кукурудза, сорт «Кубус»						
23,0	1,31	57,0	40,0	2,6	65,0	+8,0 ц/га
Цукровий буряк, сорт «Скорпіон»						
30,0	13,5	451,3	40,0	19,2	479,3	+28,0 ц/га

Внесення компосту під посів цукрового буряку у кількості 7 т/га сприяло підвищенню врожайності на 28,0 ц/га.

Така ж кількість компосту позитивно вплинула на урожайність кукурудзи, різниця з полем, де не використовували органічні добрива, становила + 8,0 ц/га.

Найкращий результат був отриманий при вирощуванні озимої пшениці. Внесення компосту в нормі 5 т/га підвищило врожайність цієї культури на 6,0 ц/га, а це, в свою чергу, сприяло отриманню додаткового прибутку у розмірі 1230,0 грн/га [28].

Таблиця 1.4

Порівняння компосту, біогазу та біопалива

Характеристика	Компост	Біогаз	Біопаливо
Призначення	Добриво для ґрунту	Джерело енергії	Рідке або тверде паливо
Сировина	Органічні відходи	Органічні відходи	Рослинна олія, жири, тваринні жири
Процес	Компостування	Анаеробне розкладання	Переробка
Переваги	Покращує структуру ґрунту, збагачує поживними речовинами, економить на добривах	Екологічно чиста енергія, економить на енергоресурсах	Екологічно чисте паливо, економить на паливі
Недоліки	Повільний процес, не підходить для всіх типів ґрунту	Вимагає спеціального обладнання, може мати неприємний запах	Вимагає спеціального обладнання, може бути дорожче традиційного палива
Економічний розрахунок	Зниження витрат на добрива (10-20%): економія $10-$20 на 100 м²	Економія на енергоресурсах (30-50%): економія $30-$50 на 100 м²	Економія на паливі (20-30%): економія $20-$30 на 100 л

З огляду на екологічні виклики, пов’язані з неконтрольованим розкладанням органічних відходів, особливо на полігонах, постає необхідність у впровадженні ефективних методів їх утилізації. Одним із ключових напрямів вирішення цієї проблеми є перетворення біовідходів на корисні ресурси. У цьому контексті доцільно розглянути та порівняти основні технології переробки органічної маси — компостування, виробництво біогазу та біопалива — з точки зору їх екологічної ефективності, економічної доцільності та потенціалу для сталого розвитку.

Розкладання органічних відходів та екологічні проблеми

Розкладання органічних відходів у ґрунті та на полігонах відбувається в умовах, які не є природними, оскільки вони мають анаеробний характер. Це призводить до того, що органічні відходи в ґрунті або під шарами інших відходів не можуть повністю розкластися, оскільки аеробні бактерії, які здійснюють глибоке окислення органічних речовин, не можуть вижити без доступу кисню. Дослідження показало, що за 5-6 років розкладається лише менше третини органічних відходів. У сприятливих природних умовах розкладання органічних відходів зазвичай займає менше року. Внаслідок штучного створення анаеробних умов органічні відходи спричиняють низку екологічних проблем [29].

Оскільки органічні відходи становлять близько 50% від загального обсягу відходів, важливо мати правильний підхід до їх утилізації. Відомо, що, потрапляючи на сміттєзвалище, органічні відходи не компостуються, а довго розкладаються, виділяючи шкідливі токсини.

Соціальний внесок у вирішення проблеми відходів

Враховуючи, що в морфологічному складі українських побутових відходів найбільшу частку займають харчові відходи, які забезпечують підвищену вологість, виникає потреба у додатковому обладнанні для сушіння відходів. Важко контролювати викиди заборонених токсичних відходів або матеріалів, таких як полівінілхлорид, які можуть утворювати велику кількість небезпечних речовин під час горіння. Атоми важких металів, залежно від їх властивостей, зосереджуються в золі або разом з незгорілою органікою та частинками пилу потрапляють у повітря. У повітря також надходять оксиди сірки, вуглецю та азоту, леткі органічні сполуки, включаючи діоксини, поліароматичні та інші хлоровмісні вуглеводні.

Для забезпечення екологічної безпеки під час роботи сміттєспалювального заводу необхідні значні фінансові витрати та система попередньої підготовки сміття, що на сучасному етапі для міст України є нереальним. Тому логічно

використовувати інші методи поводження з твердими побутовими відходами [30].

Вплив від сміттєзвалищ включає:

1. Викиди парникових газів

Коли тверді побутові відходи викидаються на сміттєзвалище, в атмосферу викидається небезпечний газ, що загрожує життю людей. Полігони твердих побутових відходів можуть виробляти 442 м³ газу, з якого 55% складається з природних газів, таких як метан. У викидах звалищного газу є дві основні газові складові та додаткові невеликі кількості інших. Метан і вуглекислий газ є основними небезпечними газами; додаткові гази, які присутні в слідових кількостях, включають аміак, сульфіди та леткі органічні сполуки (ЛОС), які не є метаном. Крім того, свіже органічне та неорганічне сміття утворюється на звалищах за допомогою хімічних та біологічних процесів. Молекули три- та перхлоретилену, наприклад, реагують з утворенням вінілхлориду. Крім того, амінокислоти перетворюються на метилмеркаптани, а сполуки сірки — на сірководень. Певні види промислових відходів, які вивозяться на звалища, також призводять до інших парникові гази. Наприклад, сірководень утворюється, коли великі гіпсові плити псуються на звалищах. Метан, вуглекислий газ, вінілхлорид, толуол, ксилоли та пропілбензол утворюються на звалищах, які збирають промислове та міське сміття.

2. Зміна клімату

Звалища виробляють і викидають в атмосферу біогаз, що сприяє глобальне потепління. Метан (CH4) і вуглекислий газ (CO_2), два з газів, які сприяють глобальному потеплінню та зміні клімату, складають більшу частину суміші, відомої як біогаз. У звіті ISWA [31] зазначено, що до 2025 року сміттєзвалища даватимуть 10% викидів парникових газів, якщо поточні тенденції збережуться і не будуть вжиті заходи. Дегазація, як правило, проводиться після того, як клітина звалища була закрита, тому метан з компонентів, які легше біологічно розкладаються, вже буде випущено в атмосферу до того, як відбудеться дегазація. Це покращення порівняно зі звичайними сміттєзвалищами, але деякі з

них все ще мають недоліки. Незважаючи на те, що вони здатні вловлювати лише частину метану, що утворюється, операції горизонтальної дегазації, спрямовані на вловлювання метану, коли клітина звалища ще працює, дають чудові результати.

3. Забруднення повітря та атмосферний вплив

Звалища викидають в атмосферу більше десяти шкідливих газів, найнебезпечніший з яких газ метан, який створюється спонтанно, коли органічна речовина розкладається. За даними EPA [32], метан, який виділяється під час розкладання органічної речовини на погано керованих звалищах, може затримувати сонячну енергію в 28 разів ефективніше, ніж вуглекислий газ. Результатом утримання тепла є вищі температури в містах і світі. Крім метану, різноманітні промислові та побутові хімікати, які потрапляють на звалища, наприклад відбілювач і аміак, можуть утворювати шкідливі гази, які мають значний негативний вплив на місцеву якість повітря. Іншим фактором поганої якості повітря є викид пилу, твердих частинок та інших нехімічних забруднювачів в атмосферу.

4. Пожежі або вибухи

Полігони твердих побутових відходів (ТПВ) є одним із основних джерел утворення метану (CH_4) — потужного парникового газу, що виникає внаслідок анаеробного розкладання органічної фракції відходів. У разі накопичення метану в замкнених або недостатньо вентильованих просторах існує ризик його самозаймання або вибуху, що може призвести до масштабних пожеж.

Такі пожежі, як правило, не пов’язані з інфраструктурними об’єктами, а виникають безпосередньо в тілі полігону. Їх частота є вищою, ніж зазвичай вважається, і вони становлять серйозну загрозу як для довкілля, так і для здоров’я населення. Під час горіння відходів вивільняються токсичні речовини, зокрема діоксини, фурани та інші небезпечні сполуки, які можуть спричинити гострі та хронічні захворювання органів дихання, алергічні реакції та онкологічні ризики.

Ступінь небезпеки залежить від кількох факторів: обсягу накопичених відходів, типу пожежі (поверхнева чи глибинна), морфологічного складу сміття,

а також геоморфологічних характеристик полігону. Крім того, неконтрольовані термічні процеси можуть пошкоджувати гідроізоляційні шари полігону, що призводить до забруднення ґрунтових вод і порушення екологічної рівноваги.

Таким чином, полігони ТПВ не лише є джерелом неконтрольованих викидів парникових газів, а й становлять потенційно вибухонебезпечні об’єкти, що потребують постійного моніторингу, дегазації та впровадження систем активного контролю за температурним і газовим режимами.

5. Забруднення ґрунту

Полігони твердих побутових відходів є одним із ключових джерел забруднення ґрунтового середовища, зокрема внаслідок інфільтрації токсичних компонентів, таких як важкі метали (свинець, ртуть тощо), у навколишні ґрунти та підземні води. Ці речовини можуть мігрувати за межі полігону, поширюючись у прилеглі екосистеми, що призводить до порушення фізико-хімічних властивостей ґрунту, зниження його родючості та негативного впливу на біоту.

Особливо небезпечним є потрапляння таких забруднювачів у сільськогосподарські угіддя, де вони можуть накопичуватися в рослинній продукції, що створює ризики для здоров’я людини та порушує агроекологічну рівновагу. Крім того, хоча сучасні полігони обладнані гідроізоляційними системами (зокрема полімерними мембранами), їх механічне пошкодження або деградація з часом можуть призвести до масштабного витоку фільтрату, що має катастрофічні наслідки для довкілля.

Таким чином, полігони ТПВ становлять потенційне джерело довготривалого техногенного навантаження на ґрунтові ресурси, що потребує постійного моніторингу, удосконалення систем захисту та впровадження екологічно безпечних технологій поводження з відходами.

6. Забруднення підземних вод

Полігони твердих побутових відходів (ТПВ) є одним із основних джерел забруднення підземних вод, зокрема через утворення та інфільтрацію фільтрату — рідини, що утворюється внаслідок проходження атмосферних опадів, поверхневого стоку та внутрішніх біохімічних процесів крізь масу відходів.

Фільтрат акумулює широкий спектр забруднювальних речовин, включаючи сполуки азоту (зокрема аміак), важкі метали (свинець, мідь, ртуть), леткі органічні сполуки (ЛОС) та токсичні органічні речовини.

Хімічний склад фільтрату є динамічним і залежить від морфології відходів, віку полігону, кліматичних умов, а також рівня опадів. У періоди інтенсивних дощів або танення снігу об’єм фільтрату значно зростає, що підвищує ризик його проникнення в навколишнє середовище, особливо за відсутності або пошкодження систем гідроізоляції.

Фільтрат полігонів ТПВ становить серйозну екологічну загрозу, оскільки містить речовини, здатні до біоакумуляції в живих організмах і подальшого перенесення по трофічних ланцюгах. Наприклад, неіонізований аміак, дубильні речовини та іони міді, виявлені у фільтраті, мають високу токсичність для водної флори та фауни. Дослідження показують, що навіть незначні концентрації аміаку можуть спричинити летальні наслідки для водних організмів. Крім того, потрапляння фільтрату в ґрунтові води негативно впливає на рослинність, знижуючи біологічну продуктивність екосистем.

Особливо небезпечними є ситуації, коли полігони не обладнані належними інженерними бар’єрами або коли відбувається порушення цілісності гідроізоляційних мембран. У таких випадках фільтрат безперешкодно потрапляє в навколишнє середовище, спричиняючи довготривале забруднення водоносних горизонтів і деградацію ґрунтових ресурсів.

7. Вплив на біорізноманіття

Формування та експлуатація полігонів для захоронення твердих побутових відходів (ТПВ) супроводжується низкою екологічних ризиків, зокрема негативним впливом на біорізноманіття та стан ґрунтових і водних екосистем. Одним із ключових чинників є необхідність вилучення природних територій під розміщення полігонів, що призводить до фрагментації або повної втрати природних середовищ існування. Це, у свою чергу, спричиняє витіснення аборигенних видів флори та фауни, особливо вразливих до змін середовища.

Крім того, полігони часто приваблюють синантропні види, такі як гризуни (наприклад, *Rattus spp.*) та всеїдні птахи (зокрема ворони), які адаптовані до споживання органічних залишків. Їхня надмірна чисельність може порушувати екологічну рівновагу, витісняючи місцеві види та змінюючи структуру трофічних ланцюгів.

Ще одним критичним аспектом є утворення фільтрату — рідини, що виникає внаслідок інфільтрації опадів і біохімічного розкладання відходів. Фільтрат містить широкий спектр токсичних компонентів, включаючи важкі метали, аміак, органічні кислоти та інші забруднювальні речовини. Потрапляння фільтрату у водойми (озера, ставки, струмки) призводить до деградації водних біотопів, зниження біорізноманіття та порушення гідробіологічних процесів.

У ґрунтовому середовищі фільтрат спричиняє зміну хімічного складу, зниження родючості, порушення мікробіологічної активності та зменшення здатності ґрунту до самовідновлення. Це негативно впливає на ріст і розвиток рослин, а також на загальну екосистемну стійкість територій, прилеглих до полігонів.

Таким чином, полігони ТПВ є джерелом комплексного антропогенного навантаження, що потребує інтегрованого підходу до планування, моніторингу та мінімізації їхнього впливу на довкілля.

8. Середовище існування біорізноманіття

Створення полігону площею понад 100 гектарів передбачає повне вилучення природних територій, що слугують середовищем існування для місцевих видів флори та фауни. У більшості випадків полігони розміщуються на значній відстані від населених пунктів, що зумовлює необхідність розчищення природних ландшафтів, включаючи вирубку дерев і знищення рослинного покриву. Це призводить до фрагментації або повного знищення екологічних коридорів, які забезпечують міграцію та життєдіяльність диких тварин.

Крім того, полігони змінюють видовий склад екосистем через залучення синантропних або інвазивних видів, які пристосовані до існування в умовах підвищеної концентрації органічних відходів. Наприклад, гризуни, ворони та

інші опортуністичні види можуть витісняти автохтонні популяції, порушуючи екологічну рівновагу.

Негативний вплив також поширюється на ґрунтову біоту. Захоронення відходів супроводжується утворенням токсичних продуктів розкладу, які проникають у ґрунт, змінюючи його хімічний склад, знижуючи біологічну активність та порушуючи функціонування ґрунтових мікроекосистем. Це, у свою чергу, впливає на ріст рослин, зменшує родючість ґрунтів і знижує їхню екологічну стійкість.

Таким чином, полігони ТПВ є джерелом комплексного екологічного навантаження, що охоплює як наземні, так і підземні компоненти природного середовища, і потребують інтегрованого підходу до планування, екологічної оцінки та управління [33].

1.3. Інноваційні технологічні та управлінські рішення у сфері управління відходами

У сучасних умовах зростання обсягів утворення відходів та посилення екологічних викликів, пов’язаних із їх накопиченням, особливого значення набуває впровадження інноваційних технологічних та управлінських рішень у сфері поводження з відходами. Ці рішення спрямовані не лише на зменшення негативного впливу на довкілля, а й на підвищення ефективності використання ресурсів, розвиток циркулярної економіки та досягнення цілей сталого розвитку.

Серед технологічних рішень, що активно впроваджуються у світі та поступово з’являються в Україні, можна виокремити:

1. *Біологічні методи утилізації органічних відходів*

Біологічні методи використовують природні процеси розкладання органічної речовини мікроорганізмами та безхребетними. Вони є екологічно прийнятними та спрямовані на отримання цінних вторинних продуктів.

1.1. Аеробне компостування

Аеробне компостування є контрольованим біологічним процесом деградації органічних матеріалів за допомогою аеробних мікроорганізмів (бактерій, грибів, актиноміцетів) у присутності кисню.

Мікробіологічна активність: Різноманітні популяції мікроорганізмів послідовно розщеплюють складні органічні молекули (целюлозу, геміцелюлозу, лігнін, білки, ліпіди) на простіші неорганічні сполуки, виділяючи при цьому тепло, вуглекислий газ та воду.

Фази компостування: Процес проходить через кілька температурних фаз:

Мезофільна фаза I (20-40°C): Активізуються мезофільні мікроорганізми, відбувається швидке розкладання легкодоступних органічних сполук (цукрів, крохмалю).

Термофільна фаза (45-70°C): Температура підвищується завдяки метаболічній активності термофільних мікроорганізмів. Ця фаза важлива для санітаризації компосту (знищення патогенів та насіння бур’янів).

Мезофільна фаза II (зниження температури): Термофільні мікроорганізми стають менш активними, їх замінюють мезофільні, відбувається подальша гуміфікація.

Фаза дозрівання (стабілізації): Відбувається повільне розкладання стійких органічних сполук, утворення гумусоподібних речовин, стабілізація компосту.

Фактори, що впливають на процес:

Співвідношення вуглецю до азоту (C:N): Оптимальне співвідношення зазвичай становить 25-30:1. Вуглець є джерелом енергії для мікроорганізмів, а азот необхідний для синтезу білків.

Вологість: Оптимальна вологість становить 50-60%. Недостатня вологість обмежує мікробну активність, надмірна – призводить до анаеробних процесів та неприємних запахів.

Аерація (вміст кисню): Забезпечення достатнього доступу кисню необхідне для аеробного дихання мікроорганізмів.

Розмір частинок: Дрібніші частинки мають більшу площу поверхні для мікробної атаки, але можуть погіршувати аерацію.

pH: Оптимальний pH для більшості мікроорганізмів знаходиться в межах 6-8.

Варіанти аеробного компостування:

- Традиційне відкритим способом (у купах, траншеях): Простий та економічний метод, але складніше контролювати параметри процесу (температуру, вологість, аерацію), що може призводити до утворення неприємних запахів та повільнішого розкладання.
- Контейнерне компостування (закриті системи): Забезпечує кращий контроль над процесом, зменшує запахи та запобігає розповсюдженню шкідників. Різні конструкції контейнерів можуть включати системи аерації та дренажу.
- Барабанне компостування: Механізована система, що забезпечує періодичне перемішування субстрату, покращуючи аерацію та гомогенність процесу, що призводить до швидшого компостування.
- Електричні компостери (швидке аеробне сушіння): Зазвичай поєднують подрібнення, нагрівання та аерацію для швидкого зменшення об’єму органічних відходів. Продукт часто є дегідратованою органічною масою, яка потребує подальшого дозрівання для отримання якісного компосту.
- Біореактори для компостування (з контрольованим середовищем): Високотехнологічні системи з повним контролем температури, вологості, аерації, pH та інших параметрів. Забезпечують швидке та ефективне компостування з мінімальними викидами.

1.2. Вермокомпостування

Вермокомпостування – це біологічний процес розкладання органічних відходів за допомогою дощових черв’яків, зокрема виду Eisenia fetida (червоний каліфорнійський черв’як) та інших компостних черв’яків.

Травлення черв’яків: Черв’яки поглинають органічну речовину, яка подрібнюється в їхньому травному тракті. Ферменти, що виділяються черв’яками та їхньою кишковою мікрофлорою, розщеплюють складні органічні сполуки.

Вплив мікроорганізмів: Проходження органіки через травну систему черв’яків стимулює активність корисних мікроорганізмів, які продовжують процес розкладання.

Утворення біогумусу: Продукт життєдіяльності черв’яків (капроліти) є цінним органічним добривом – біогумусом. Він характеризується високим вмістом гумінових речовин, макро- та мікроелементів у легкодоступній для рослин формі, а також корисних мікроорганізмів.

Гумінові речовини: Утворюються в процесі розкладання органічної речовини та мають складну полімерну структуру. Вони покращують фізичні, хімічні та біологічні властивості ґрунту, підвищують його родючість, вологоутримуючу здатність та сприяють розвитку кореневої системи рослин.

Вермокомпостування є ефективним методом переробки харчових відходів, опалого листя, гною та інших органічних матеріалів у невеликих масштабах (приватні господарства, школи, екопроєкти). Існують також промислові вермоферми для переробки значних обсягів органічних відходів.

2. Анаеробні методи утилізації органічних відходів (без кисню)

Анаеробні методи передбачають розкладання органічної речовини мікроорганізмами в безкисневому середовищі. Основним продуктом цього процесу є біогаз.

2.1. Анаеробне зброджування (біогаз)

Анаеробне зброджування (метанове бродіння) – це складний біохімічний процес, який здійснюється консорціумом анаеробних мікроорганізмів (бактерій та архей) і призводить до розкладання органічної речовини з утворенням біогазу, що складається переважно з метану (CH_4) та вуглекислого газу (CO_2).

Етапи анаеробного зброджування:

- Гідроліз: Позаклітинні ферменти гідролізують складні органічні полімери (вуглеводи, білки, ліпіди) до розчинних мономерів (цукрів, амінокислот, жирних кислот).

- Ацидогенез (кислотоутворення): Кислотоутворюючі бактерії ферментують розчинні мономери до летких жирних кислот (оцтової, пропіонової, масляної та ін.), спиртів, водню та вуглекислого газу.
- Ацетогенез (ацетатоутворення): Ацетогенні бактерії перетворюють продукти ацидогенезу (крім оцтової кислоти, водню та вуглекислого газу) на оцтову кислоту, водень та вуглекислий газ.
- Метаногенез (метаноутворення): Метаногенні археї використовують ацетат (ацетатокластичні метаногени) або водень та вуглекислий газ (гідрогенотрофні метаногени) для утворення метану.

Мікробіологічні аспекти: Різні групи бактерій та архей функціонують у симбіозі, забезпечуючи ефективне перетворення органічної речовини на біогаз. Стабільність мікробної спільноти є критично важливою для ефективності процесу.

Фактори, що впливають на процес:

Температура: Анаеробне зброджування може відбуватися в мезофільних (30-40°C) або термофільних (50-60°C) умовах. Температура впливає на швидкість метаболічних реакцій та склад мікробної спільноти.

pH: Оптимальний pH для більшості метаногенних архей знаходиться в межах 6.5-7.5.

Співвідношення вуглецю до азоту (C:N): Оптимальне співвідношення є важливим для збалансованого живлення мікроорганізмів.

Вміст вологи: Субстрат повинен мати достатню вологість для забезпечення активності мікроорганізмів.

Наявність інгібіторів: Деякі речовини (наприклад, важкі метали, високі концентрації аміаку, сульфідів) можуть інгібувати активність мікроорганізмів.

Продукти:

Біогаз: Основний енергетичний продукт, який може використовуватися для виробництва електроенергії та тепла, або як паливо для транспорту.

Дигестат (біошлам): Залишковий матеріал після анаеробного зброджування. Він багатий на поживні речовини (азот, фосфор, калій) і може

використовуватися як органічне добриво після відповідної обробки (наприклад, сепарації, компостування).

Анаеробне зброджування широко застосовується для переробки гною на фермах, осадів стічних вод на очисних станціях, харчових відходів та інших органічних субстратів на великих біогазових комплексах.

Органічні відходи становлять значну частину відходів, що утворюються в процесі життєдіяльності людини. Вони швидко розкладаються і виділяють метан, парниковий газ, який є більш потужним за вуглекислий газ.

Таблиця 1.5

Аналіз методів утилізації

Метод утилізації	Ефективність	Переваги	Недоліки
Компостування	Висока	Використання відходів як добрива, Зменшення викидів парникових газів, Економічна ефективність	Необхідність спеціального обладнання і контролю, Неможливість утилізації деяких видів відходів
Спалювання	Середня	Зменшення обсягу відходів, Знищення шкідливих речовин	Виділення шкідливих речовин в атмосферу, Витрати на паливо
Механічна переробка	Низька	Використання відходів як сировини для виробництва нових продуктів	Витрати на обладнання і транспортування, Відходи, які не підлягають переробці, все одно утилізуються на полігонах
Біогазове виробництво	Низька	Виробництво біогазу, який може бути використаний як паливо	Витрати на обладнання і транспортування, Відходи, які не підлягають біогазовому виробництву, все одно утилізуються на полігонах

Як видно з таблиці, компостування є найбільш ефективним методом утилізації відходів. Цей метод дозволяє використовувати відходи як добрива, що сприяє відновленню родючості ґрунту. Крім того, компостування дозволяє зменшити викиди парникових газів і є економічно ефективним.

Таблиця 1.6

Порівняння аеробного та анаеробного компостування

Характеристика	Аеробне компостування	Анаеробне компостування
Наявність кисню	Необхідний	Відсутній
Мікроорганізми	Аеробні	Анаеробні
Кінцевий продукт	Компост	Біогаз, дигестат
Швидкість процесу	Швидкий	Повільний
Обладнання	Просте	Спеціальне
Застосування	Добриво	Паливо, добриво

3. *Термохімічні методи утилізації органічних відходів*

Термохімічні методи використовують високі температури для перетворення органічних відходів на цінні продукти.

3.1. Піроліз

Піроліз – це процес термічного розкладання органічної речовини за відсутності або при обмеженому доступі кисню при температурах зазвичай від 400 до 700°C.

Термічна деструкція: Під впливом високої температури складні органічні молекули розпадаються на менші молекули шляхом розриву хімічних зв’язків.

Фактори, що впливають на процес:

Температура: Вища температура сприяє більш глибокому розкладанню та зміні співвідношення продуктів.

Швидкість нагріву: Швидке піролізування може призвести до утворення більшої кількості рідких продуктів (піролізної рідини), тоді як повільне – до більшого виходу твердого залишку (біовугілля).

Час перебування: Час, протягом якого матеріал перебуває при високій температурі, також впливає на склад продуктів.

Каталізатори: Використання каталізаторів може спрямовувати реакції піролізу для отримання бажаних продуктів.

Продукти:

Біовугілля (біочар): Твердий пористий матеріал з високим вмістом вуглецю. Може використовуватися як ґрунтовий меліорант, адсорбент, паливо.

Піролізна рідина (біонафта): Складна суміш органічних сполук, що може використовуватися як рідке паливо або як сировина для хімічної промисловості після відповідної переробки.

Піролізний газ (синтез-газ): Суміш горючих газів, таких як водень (H_2), метан (CH_4), оксид вуглецю (CO) та вуглекислий газ (CO_2), яка може використовуватися для виробництва енергії.

3.2. Газифікація

Газифікація – це термохімічний процес перетворення органічної речовини в газоподібне паливо – синтез-газ (суміш CO та H_2) – шляхом часткового окиснення при високих температурах (зазвичай 700-1400°C) з використанням обмеженої кількості окиснювача (повітря, кисню або пари).

Неповне згоряння: На відміну від повного згоряння, газифікація відбувається за умов недостатнього кисню, що запобігає утворенню переважно CO_2 та H_2O.

Хімічні реакції: В процесі газифікації відбуваються складні хімічні реакції, включаючи часткове окиснення, відновлення, парове перетворення та реакцію Вотергаса ($CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$).

Фактори, що впливають на процес:

Температура: Вища температура сприяє більш ефективному перетворенню та збільшенню виходу синтез-газу.

Тиск: Підвищений тиск може покращити ефективність газифікації.

Тип газифікуючого агента: Повітря, кисень та пара впливають на склад та теплотворну здатність синтез-газу.

Каталізатори: Можуть використовуватися для підвищення ефективності та контролю складу синтез-газу.

Продукт:

Синтез-газ: Основний продукт газифікації, який може використовуватися для виробництва електроенергії та тепла за допомогою газових турбін або двигунів внутрішнього згоряння, а також як сировина для синтезу рідких палив (наприклад, за процесом Фішера-Тропша) та хімічних речовин.

3.3. Спалювання (інсинерація)

Спалювання (інсинерація) – це процес повного окиснення органічних відходів при високих температурах (зазвичай 800-1000°C) з надлишком кисню, що призводить до утворення тепла, вуглекислого газу та води.

Екзотермічна реакція: Спалювання є екзотермічною хімічною реакцією, в якій виділяється значна кількість теплової енергії.

Повне окиснення: За достатньої кількості кисню органічні сполуки повністю окиснюються до CO_2 та H_2O.

Утворення попелу: Неорганічні компоненти відходів утворюють золу та шлак.

Спалювання використовується для зменшення об’єму відходів, особливо змішаних комунальних відходів та небезпечних відходів. Отримана теплова енергія може бути використана для виробництва пари та електроенергії (енергетична утилізація відходів – Waste-to-Energy).

Екологічний аспект: спалювання може мати негативний вплив на навколишнє середовище через викиди забруднюючих речовин в атмосферу (пил, оксиди азоту та сірки, діоксини, фурани). Сучасні установки для спалювання оснащуються складними системами очищення викидів для мінімізації їхнього впливу на довкілля. Проте, для високовологих органічних фракцій спалювання є енергетично неефективним через необхідність попереднього видалення вологи.

4. Фізико-хімічні методи утилізації органічних відходів

Фізико-хімічні методи використовують комбінацію фізичних та хімічних процесів для перетворення органічних відходів.

4.1. Гідротермальна карбонізація (HTC)

Гідротермальна карбонізація (HTC) – це термохімічний процес перетворення вологих органічних відходів у гідровугілля (hydrochar) в автоклаві при відносно низьких температурах (180-250°C) та підвищеному тиску (зазвичай 2-10 МПа) у присутності води.

Гідроліз та дегідратація: У гарячій стиснутій воді відбуваються реакції гідролізу складних органічних полімерів (целюлози, геміцелюлози, лігніну) та подальша дегідратація отриманих мономерів.

Карбонізація: Відбувається збагачення матеріалу вуглецем за рахунок видалення кисню та водню у вигляді води та інших летких сполук.

Фактори, що впливають на процес:

Температура: Впливає на швидкість реакцій та склад гідровугілля.

Час реакції: Довший час реакції може призвести до більш високого ступеня карбонізації.

Тиск: Необхідний для підтримки води в рідкому стані при високих температурах та впливає на швидкість реакцій.

pH: Може впливати на каталітичну активність води та швидкість гідролізу.

Вихідна сировина: Склад органічних відходів значно впливає на властивості отриманого гідровугілля.

Продукт:

Гідровугілля (гідрочар): Твердий, багатий на вуглець матеріал з гідрофобними властивостями. Може використовуватися як тверде біопаливо, ґрунтовий меліорант, адсорбент для видалення забруднювачів з води та ґрунту.

Застосування:

Гідротермальна карбонізація є інноваційною технологією, яка особливо перспективна для переробки вологих органічних відходів (наприклад, осаду стічних вод, харчових відходів, водоростей), оскільки не потребує попереднього енергоємного процесу сушіння. Наразі технологія знаходиться на стадії активного дослідження та впровадження.

5. Альтернативне використання органічних відходів

Окрім традиційних методів утилізації, органічні відходи можуть знайти застосування в інших сферах.

5.1. Використання у тваринництві

Деякі види органічних відходів (наприклад, зернові відходи, макуха олійних культур, овочеві та фруктові вичавки) можуть використовуватися як

кормові добавки для тварин після відповідної обробки та за умови дотримання ветеринарно-санітарних норм. Ферментація органічних відходів може підвищити їхню поживну цінність та засвоюваність для тварин.

Поживна цінність: Органічні відходи можуть містити значну кількість вуглеводів, білків, жирів, вітамінів та мінеральних речовин, необхідних для харчування тварин.

Ферментація: Мікробіологічна ферментація може покращити засвоюваність поживних речовин, зменшити вміст антипоживних факторів та збагатити корм пробіотиками.

Санітарні вимоги: Важливо забезпечити безпеку кормів шляхом термічної обробки, силосування або інших методів для знищення патогенних мікроорганізмів.

5.2. Виробництво біоматеріалів

Органічні відходи можуть слугувати сировиною для виробництва різноманітних біоматеріалів, сприяючи розвитку циркулярної економіки.

Біопакування: Виробництво плівок, лотків, контейнерів з крохмалю, целюлози, лігніну, хітину, отриманих з рослинних відходів або відходів харчової промисловості.

Агроплівки: Виготовлення біорозкладних плівок для мульчування ґрунту з крохмалю або інших біополімерів.

Органічні добрива: Переробка органічних відходів на компост, біогумус, рідкі органічні добрива.

Будівельні матеріали: Використання рослинних волокон (наприклад, з костриці, льону, соломи) для виробництва біокомпозитів, теплоізоляційних матеріалів, будівельних блоків.

Біопластики: Синтез біорозкладних полімерів з цукрів, рослинних олій або інших біоресурсів, отриманих з органічних відходів.

Хімічна модифікація: Органічні компоненти відходів можуть піддаватися хімічній або фізичній модифікації для отримання матеріалів з бажаними властивостями.

Біосинтез: Мікроорганізми можуть використовуватися для виробництва біополімерів з органічних відходів як субстрату.

Композиційні матеріали: Поєднання різних органічних компонентів та інших матеріалів для створення нових матеріалів з покращеними характеристиками.

Інноваційні технологічні та управлінські рішення є ключовими чинниками у формуванні сучасної системи поводження з відходами. Їх впровадження дозволяє не лише зменшити екологічне навантаження, а й створити нові можливості для економічного розвитку громад, підвищити ефективність використання ресурсів та сприяти переходу до циркулярної економіки.

Загалом, біотехнологічні методи з механіко-біологічною переробкою сміття є найбільш доцільними та екологобезпечними. Вони полягають у такій послідовності операцій [34]: − з ТПВ видаляються крупні та небезпечні відходи; − відсортовується вторсировина (метал, пластик, скло, папір тощо), яка реалізуються переробником; − органічна фракція підлягає компостуванню; − отримані компости використовуються у агросфері або для рекультивації земель. Компост (від лат. compositus – складовий) – органічне добриво, утворене внаслідок розкладу органічних речовин мікроорганізмами. Компостуванню підлягають всі види органічних відходів, які мають значну частку органічних речовин. Ефективність процесу компостування залежить від температури, pH, вологості та співвідношення азоту і вуглецю

Кращим вважається аеробний спосіб компостування. Органіку для компосту складують так, щоб забезпечити належний доступ повітря. Компостну купу періодично зволожують для підтримання мікробіологічної діяльності. Під час компостування температура всередині підвищується внаслідок діяльності бактерій. Процес може тривати від кількох тижнів до кількох місяців залежно від вихідної сировини. У результаті біохімічних та біологічних перетворень в органічній масі збільшується вміст доступних для рослин елементів живлення, знешкоджуються патогенні мікроорганізми, а готовий компост за запахом та кольором нагадує ґрунт. Компостування органіки здійснюється на спеціально

обладнаному майданчику, що включає зону компостування і зону зберігання готового продукту. Необхідне технологічне обладнання навантажувачі, аератори, змішувачі. Виготовлення компосту в обсязі 5-30 тис. т за рік відбувається за допомогою мобільних машин на майданчиках, 40-50 тис. т за рік – здійснюється в механізованих сховищах, 100 тис. т і більше за рік – в цехах за допомогою стаціонарних установок [35]. Компостування має ряд переваг, оскільки забезпечує скорочення об'ємів ТПВ, що надходять на звалище, скорочує транспортні витрати, зменшує забруднення довкілля, а також потребує невеликих капітальних та експлуатаційних витрат. Технологія компостування відзначається своєю економічною ефективністю порівняно з іншими альтернативними методами [36].

Очікується, що до 2050 року світове сміття досягне 4 мільярдів тонн. Швидке зростання пов'язане із зростанням міського населення та зростанням споживчої культури за останні кілька десятиліть, що не сповільнюється найближчим часом. Щоб зменшити навантаження на навколишнє середовище та служби збору відходів, громади по всьому світу звертаються до розумних технологій та рішень для управління відходами.

Розумне управління відходами — це будь-яка система, яка використовує технологію, щоб зробити збір сміття більш ефективним, економічно ефективним та екологічно чистим.

За даними Агентства з охорони навколишнього середовища (EEA) [37], приблизно 75% потоку відходів у Сполучених Штатах підлягають вторинній переробці, але фактично переробляється лише близько 30% вторинної сировини. Враховуючи, що люди виробляють трохи більше 2 мільярдів тонн відходів щороку, це багато непотрібного сміття, що потрапляє на світові звалища та водні шляхи.

Світова проблема зі сміттям не зникне найближчим часом, а традиційні системи поводження з відходами не обладнані для боротьби з зайвим сміттям, яке створюється зростаючим населенням. Щоб подолати цю прогалину, громади повинні прийняти розумні технології поводження з відходами, які підвищують

ефективність, знижують витрати на збирання та відводять більше сміття зі звалищ.

Першим кроком до створення ефективних, стійких систем управління відходами є вивчення, чому наші нинішні системи не працюють. Наведені нижче технології поєднують аналітику даних із сучасними рішеннями, щоб допомогти виявляти проблеми та покращувати їх у міру їх появи.

1. Розумні контейнери для сміття

Залишаючись напризволяще, люди не завжди турбуються про сортування відходів у відповідні контейнери для сміття або для переробки. Щоб зменшити неправильне сортування вторсировини, польська компанія Bin-e розробила розумний сміттєвий контейнер, який використовує розпізнавання об’єктів на основі штучного інтелекту для автоматичного сортування вторинної сировини в окремі відсіки. Після сортування машина стискає відходи та відстежує, наскільки заповнений кожен контейнер.

Рис. 1.4. Ілюстрований розумний контейнер для сміття

Розумні контейнери для сміття усувають людську помилку під час початкового процесу сортування, роблячи переробку матеріалу швидшою та простішою для підприємств з переробки. Це може знизити витрати на управління відходами аж на 80% і значно підвищити ефективність роботи співробітників.

2. Датчики рівня відходів

Будинки та підприємства по всій країні покладаються на звичайні послуги зі збору відходів, щоб утилізувати своє сміття. Щотижневі послуги існують протягом десятиліть, але вони не завжди є найефективнішим варіантом.

Щоб звести до мінімуму непотрібні поїздки на сміттєзвалища та зі сміттєзвалища, компанії та громади можуть встановлювати датчики рівня відходів у урни або смітники будь-якого розміру. Ці пристрої збирають і зберігають дані про рівні заповнення, дозволяючи службам збору передбачити, як часто потрібно спорожняти контейнери. Це також допомагає запобігти переповненню громадських контейнерів і забрудненню прилеглої території.

3. Роботи з переробки

Центри переробки відіграють вирішальну роль у зменшенні кількості сміття, яке щороку потрапляє на сміттєзвалища та водні шляхи. Однак через скорочення робочої сили під час пандемії COVID-19 багато центрів намагаються не відставати від попиту. На щастя, роботи з переробки на основі штучного інтелекту (AI) можуть допомогти подолати слабість.

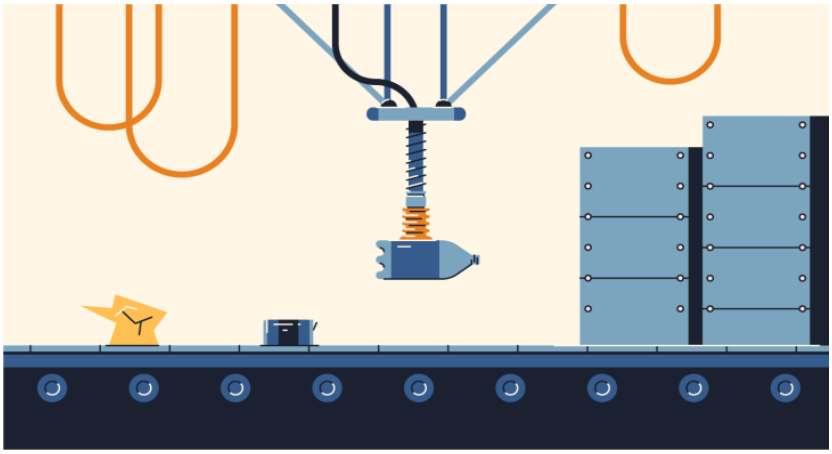


Рис.1.5. Ілюстрація переробного робота

Ці роботи розроблені для точного визначення та сортування матеріалів, що підлягають переробці, підвищуючи ефективність і зменшуючи потребу в роботі людей. Це не тільки заощаджує гроші центрів переробки з часом, але й допомагає відволікати матеріали, які в іншому випадку опинилися б на звалищах.

4. Механізми зважування сміттєвозів

Як і датчики рівня відходів, вагові механізми, встановлені в сміттєвозах, можуть допомогти передбачити рівень наповнення та зменшити кількість поїздок на збір. Вони роблять це, вимірюючи та зберігаючи вагу контейнерів для відходів, а потім використовуючи дані для прогнозування рівнів наповнення з часом. Міста можуть використовувати цю технологію, щоб точніше передбачити, як часто їм потрібно відправляти свої вантажівки та зменшити щорічні витрати на збір.

5. Пневматичні каналізаційні труби

Зі зростанням населення в міських районах зростає потреба в рішеннях щодо поводження з відходами, які можуть вмістити все більшу кількість сміття. Деякі міста вирішують цю проблему, встановлюючи контейнери для сміття, які з'єднуються з серією підземних труб. Сміття по трубах потрапляє на сміттєпереробний завод, де його можна сортувати або вивозити. Ця система усуває необхідність традиційного збору відходів, знижує витрати на електроенергію та підвищує загальну ефективність.

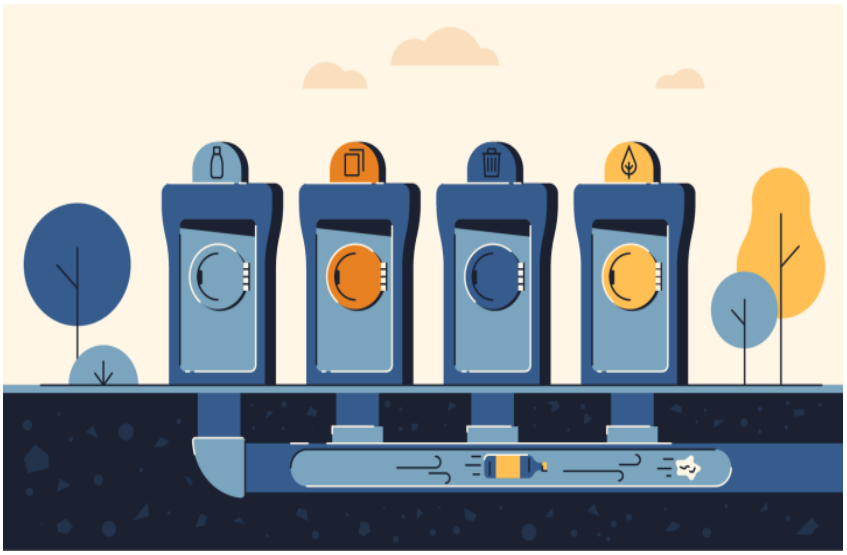


Рис. 1.6. Ілюстровані пневматичні сміттєпроводи

6. Ущільнювачі сміття на сонячних батареях

Прагнучи підвищити ефективність збирання та скоротити поїздки на смітник і назад, виробник Ecube Labs створив компактор для сміття на сонячній батареї, який може вмістити до п'яти разів більше, ніж традиційні урни для

сміття. Ці машини стискають сміття в міру його накопичення, щоб збільшити місткість контейнера, а також збирають і передають дані про час заповнення та збору, щоб спростити процес збору.

7. Кіоски електронних відходів

Електронні відходи, які неправильно утилізовані, можуть бути шкідливими як для людей, так і для навколишнього середовища. На щастя, багато компаній і організацій запустили програми переробки електронного сміття, які приймуть — і навіть відшкодують — старі електронні пристрої.

ecoATM, компанія, що займається розумною переробкою відходів, розробила цю ідею ще далі, створивши лінійку кіосків для переробки електронних відходів, які дозволяють обміняти свою електроніку на готівку на місці. Хоча вони не завжди пропонують готівку за пошкоджені чи знищені пристрої, вони приймають телефони, планшети та MP3-плеєри в будь-якому стані та гарантують, що вони належним чином переробляються.

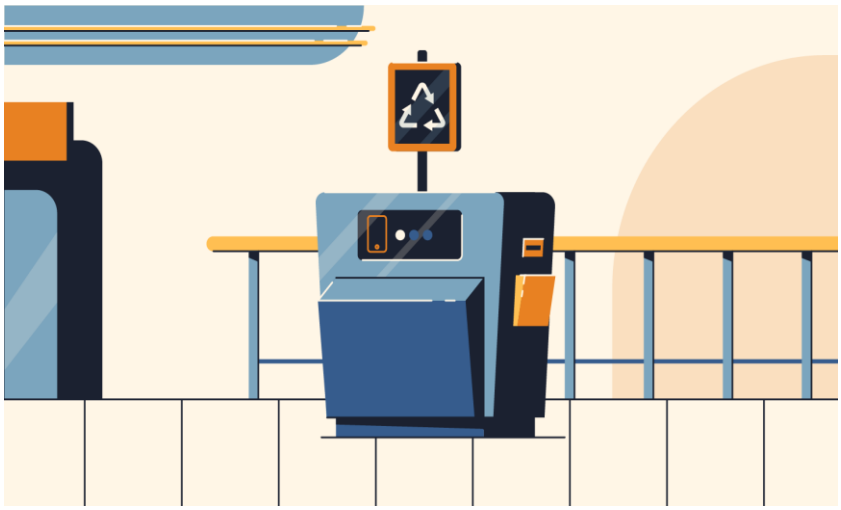


Рис. 1.7. Ілюстрований кіоск електронних відходів [38].

Висновки до розділу 1

У розділі 1 було проведено всебічний аналіз методів та технологій управління відходами. Зокрема, було розглянуто наступні аспекти:

1. **Передумови та джерела утворення відходів** свідчать про зростаючий обсяг утворення побутових, промислових та сільськогосподарських відходів, зокрема біовідходів, що зумовлено урбанізацією, зростанням населення та змінами у споживчих звичках. Це створює значне навантаження на існуючі системи поводження з відходами.
2. **Система поводження з біовідходами в Україні** перебуває на етапі становлення. Незважаючи на наявність нормативно-правової бази, існують суттєві проблеми з її реалізацією на практиці. Основними викликами є недостатній рівень інфраструктури, низька обізнаність населення та відсутність стимулів для сортування та переробки біовідходів.
3. **Інноваційні технології та управлінські рішення** у сфері управління відходами демонструють значний потенціал для покращення ситуації. До них належать біоенергетичні установки, компостування, анаеробне зброджування, цифрові платформи для моніторингу потоків відходів, а також інтегровані моделі управління, що поєднують екологічні, економічні та соціальні аспекти.

Таким чином, ефективне управління відходами вимагає комплексного підходу, що включає як впровадження сучасних технологій, так і удосконалення нормативної бази, підвищення екологічної свідомості населення та розвиток партнерств між державним, приватним і громадським секторами.

РОЗДІЛ 2
НОРМАТИВНО-ПРАВОВІ ЗАХОДИ В СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ТА ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ

2.1. Ключові принципи управління відходами в країнах Європи

За прогнозами, до 2050 року обсяг глобального утворення твердих побутових відходів може зрости з 2,1 мільярда тонн у 2023 році до 3,8 мільярда тонн, що свідчить про суттєве зростання навантаження на системи управління відходами. Існує чітка залежність між рівнем доходу населення та кількістю утворених відходів: у країнах з високим рівнем доходу очікується зростання щоденного утворення відходів на душу населення приблизно на 19%, тоді як у країнах із низьким і середнім рівнем доходу цей показник може зрости на 40% і більше.

На початкових етапах економічного розвитку обсяги відходів зменшуються, однак із підвищенням доходів темпи їх зростання прискорюються, особливо в країнах із низьким рівнем доходу. Очікується, що до 2050 року загальний обсяг відходів у цих країнах зросте більш ніж утричі.

Найбільшу частку глобального утворення відходів наразі становить регіон Східної Азії та Тихоокеанського басейну (23%), тоді як найменші обсяги фіксуються в регіоні Близького Сходу та Північної Африки (6%). Водночас найвищі темпи зростання утворення відходів спостерігаються в країнах Африки на південь від Сахари, Південної Азії, а також у регіонах Близького Сходу та Північної Африки, де до 2050 року прогнозується триразове, дворазове та майже дворазове зростання відповідно.

У цих регіонах значна частина відходів досі утилізується шляхом відкритого скидання, що створює серйозні загрози для довкілля, здоров’я населення та соціально-економічного розвитку. Така динаміка вимагає термінового впровадження ефективних стратегій управління відходами на національному та регіональному рівнях [39].

Рис. 2.1. Прогнозне утворення відходів за регіонами (млн. тонн/рік)

Збір відходів є важливим кроком в управлінні відходами, але ставки значно різняться в залежності від рівня доходу, при цьому країни з рівнем доходу вище середнього та високого рівня забезпечують майже повний збір відходів. Країни з низьким рівнем доходу збирають близько 48 відсотків відходів у містах, але за межами міст ця частка різко падає до 26 відсотків.

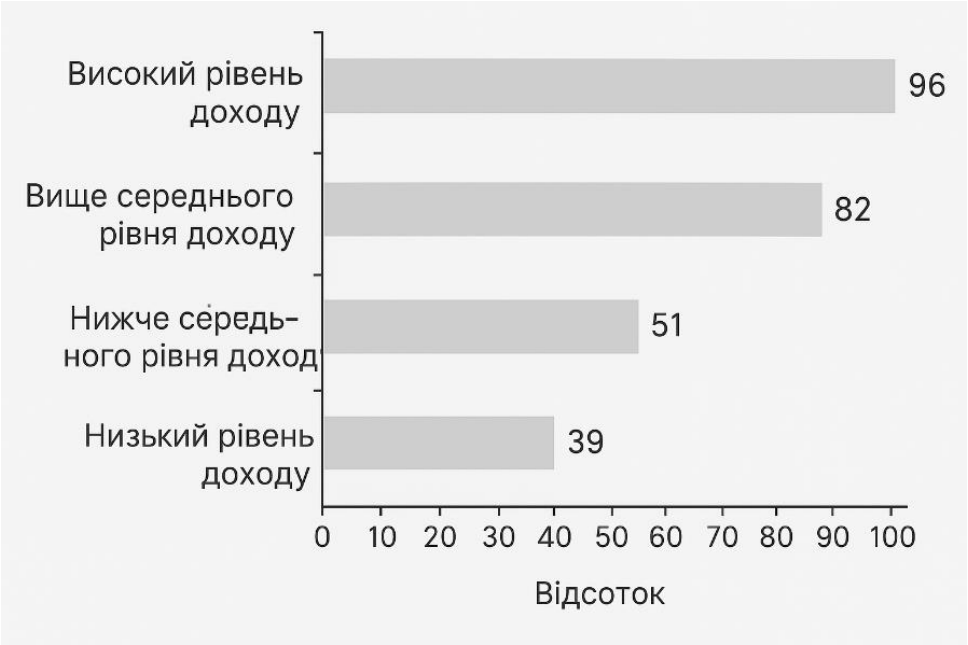


Рис.2.2. Рівень збору відходів, за рівнем доходу, %

Структура твердих побутових відходів значною мірою залежить від рівня економічного розвитку країни, що зумовлено відмінностями у споживчих звичках. У державах із високим рівнем доходу спостерігається менша частка органічних відходів (харчові залишки та зелені відходи), яка становить близько 32% загального обсягу. Натомість переважають сухі відходи, придатні до вторинної переробки, зокрема пластик, папір, метал, скло та картон, які разом складають приблизно 51% потоку відходів.

У країнах із середнім і низьким рівнем доходу домінують органічні компоненти — 53% і 57% відповідно. Частка перероблюваних матеріалів у загальному обсязі відходів у країнах з низьким рівнем доходу є незначною і становить лише близько 20%. Загалом, відмінності у складі відходів між регіонами світу здебільшого зумовлені рівнем доходу, а не географічними особливостями. В усіх регіонах, за винятком Європи, Центральної Азії та Північної Америки, органічні відходи становлять понад половину загального обсягу.

У ЄС щорічно на вторинну сировину переробляється 61 млн. тонн ТПВ [40] , що в чотири рази перевищує річний обсяг утворення ТПВ в Україні. Рівень переробки побутових відходів у Європі сильно варіюється в залежності від країни.

Рис. 2.3. Показники переробки ТПВ у деяких країнах Європи

Рівень переробки твердих побутових відходів (ТПВ) у європейських країнах значною мірою залежить від розвитку інфраструктури, ефективності політики у сфері управління відходами та рівня екологічної свідомості населення. На відміну від промислових відходів, обсяги яких можна зменшити шляхом впровадження ресурсоефективних технологій, у сфері комунального господарства запобігання утворенню відходів є складним завданням. Це зумовлено тим, що побутові відходи є невід'ємною складовою процесу споживання товарів і послуг, зокрема упаковки, харчових залишків, використаної побутової техніки тощо.

У зв'язку з цим стратегія Європейського Союзу у сфері поводження з ТПВ орієнтована не стільки на запобігання їх утворенню, скільки на формування екологічно збалансованої системи управління потоками відходів. Основні принципи цієї політики закріплені в Директиві 2008/98/ЄС, яка визначає пріоритети у сфері поводження з відходами, зокрема охорону довкілля, зменшення негативного впливу відходів на здоров'я населення та навколишнє середовище. Документ також встановлює загальні вимоги до організації системи переробки ТПВ, залишаючи при цьому кожній державі-члену право самостійно формувати її структуру відповідно до національних умов [41].

Система управління відходами в країнах Європейського Союзу базується на комплексному підході, що поєднує правові, економічні, технологічні та соціальні інструменти. Основою цієї системи є низка ключових принципів, закріплених у нормативно-правових актах ЄС, зокрема в Директиві 2008/98/ЄС про відходи, яка визначає рамкову політику у сфері поводження з відходами.

1. Ієрархія поводження з відходами

Центральним елементом європейської політики є ієрархія управління відходами, яка встановлює пріоритетність дій у такій послідовності:

- Запобігання утворенню відходів;
- Підготовка до повторного використання;
- Рециклінг (переробка);
- Інші види утилізації (наприклад, енергетична);

- Захоронення як останній засіб.

Цей підхід спрямований на мінімізацію негативного впливу відходів на довкілля та здоров'я населення, а також на ефективне використання ресурсів.

2. Принцип «забруднювач платить»

Цей принцип передбачає, що особа або організація, яка спричиняє утворення відходів, несе фінансову відповідальність за їх належне управління. Він реалізується через:

- Розширену відповідальність виробника (EPR) — виробники зобов'язані забезпечити збір, переробку або утилізацію своєї продукції після завершення її життєвого циклу;
- Тарифи для споживачів — домогосподарства та підприємства оплачують послуги з утилізації відповідно до обсягів і типу відходів.

3. Інтегроване управління та децентралізація

Європейська модель передбачає інтеграцію всіх етапів управління відходами — від збору до остаточної утилізації — з урахуванням екологічних, економічних і соціальних чинників. Значна роль у реалізації політики належить місцевим органам влади, які мають повноваження щодо організації системи збору, сортування та переробки відходів на своїй території.

4. Прозорість та участь громадськості

У країнах ЄС активно впроваджуються механізми інформування та залучення громадян до процесів управління відходами. Це включає:

- Освітні кампанії;
- Прозорість у звітності про обсяги та способи утилізації;
- Стимулювання участі у роздільному зборі.

5. Інновації та циркулярна економіка

Європейська політика активно підтримує впровадження інноваційних технологій, що сприяють переходу до циркулярної економіки — моделі, в якій ресурси залишаються в обігу якомога довше. Це включає розвиток вторинного ринку матеріалів, екодизайн продукції та цифрові рішення для моніторингу потоків відходів.

Практика ЄС демонструє, що визначення пріоритетів у сфері управління відходами значною мірою залежить від суспільного вибору та стратегічних орієнтирів, закладених на державному рівні. При плануванні та реалізації проєктів доцільно враховувати регіональні особливості — обсяги та морфологію відходів, попит на вторинну сировину та енергію, кліматичні умови, сезонні коливання, а також доступність земельних ресурсів. У зв'язку з необхідністю підвищення рівня переробки, перевага надається технологіям, що забезпечують мінімальні втрати матеріалів та енергії. Кожна країна ЄС обирає власні підходи до реалізації цілей, адаптуючи проєкти та технології до місцевих умов.

Ключовим етапом еволюції системи управління відходами в ЄС став перехід від процедурного підходу, орієнтованого на регулювання окремих етапів поводження з відходами, до стратегічного планування, що передбачає побудову ієрархії цілей та розробку механізмів їх досягнення з урахуванням локального контексту.

Пріоритети у сфері управління твердими побутовими відходами (ТПВ) в Європейському Союзі визначаються на основі нормативно-правових актів, зокрема директив, які встановлюють загальні принципи, стратегічні цілі та вимоги до функціонування системи. Водночас конкретні механізми реалізації цих положень, включаючи економічні стимули, визначаються національними законодавчими органами. Оператори ринку, у свою чергу, відповідають за впровадження відповідних технологій і процедур, що забезпечують досягнення встановлених цілей та відповідність санітарним і екологічним стандартам ЄС.

Політика ЄС у сфері поводження з ТПВ ґрунтується на трьох ключових засадах:

1. Забезпечення екологічної безпеки на всіх етапах життєвого циклу відходів;
2. Дотримання ієрархії методів управління відходами, яка передбачає пріоритет запобігання, повторного використання, переробки, утилізації та, в останню чергу, захоронення;
3. Реалізація принципу «забруднювач платить», що охоплює як розширену відповідальність виробника, так і обов'язок споживачів (домогосподарств

і підприємств) покривати витрати на екологічно безпечну утилізацію відходів.

На початковому етапі формування системи управління ТПВ важливим є забезпечення соціальних та екологічних стандартів, зокрема повного охоплення населення послугами зі збирання та транспортування відходів, а також безпечного захоронення на полігонах відповідно до санітарних норм. Лише після створення базової інфраструктури можливий подальший розвиток системи шляхом впровадження більш ефективних методів переробки та утилізації.

Країни ЄС реалізовували ці підходи з урахуванням власних умов: розвинені держави поступово вдосконалювали системи управління, тоді як нові члени ЄС (так звані ЄС-12) проходили цей шлях прискореними темпами. Одним із ключових чинників ефективності регіональної політики у сфері відходів є визначення права власності на відходи. У країнах, які досягли значного прогресу (наприклад, у Скандинавії), муніципалітети виступають власниками відходів, що дозволяє їм самостійно або у співпраці з іншими громадами приймати рішення щодо їх обробки. У такій системі домогосподарства оплачують повну вартість утилізації, причому найвищі тарифи застосовуються до захоронення, а нижчі — до спалювання.

Після досягнення цільових показників ефективності, зокрема рівня переробки на рівні 50–60% загального обсягу відходів, наступним етапом розвитку є впровадження концепції «нульових відходів» (zero waste). Цей підхід активно підтримується в рамках «зеленої» економіки та корпоративної відповідальності, зокрема в офісному середовищі, і передбачає мінімізацію утворення відходів на всіх етапах виробництва та споживання.

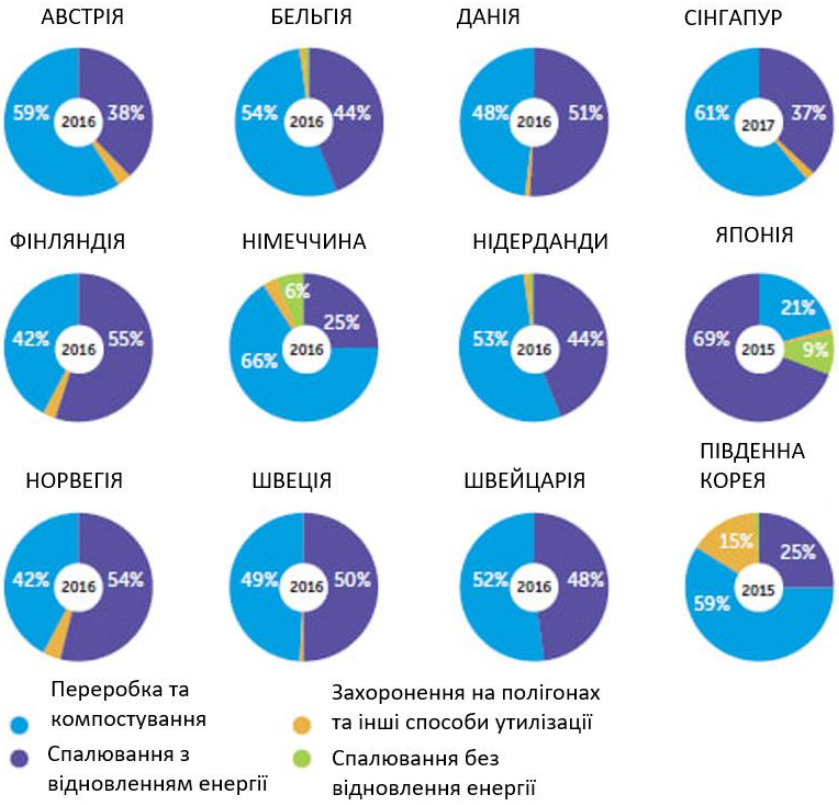


Рис. 2.4. Управління відходами в країнах Європи [42]

Управління органічними відходами є одним з напрямів в екологічній політиці багатьох країн світу, які найбільш динамічно розвиваються. Значна частина країн Європейського Союзу, а також Японія, Південна Корея, Канада та США вже мають успішні моделі поводження з органікою, інтегровані у стратегії сталого розвитку та циркулярної економіки.

У країнах ЄС основою ефективної утилізації є законодавча вимога до роздільного збору органічної фракції (bio-waste). Наприклад, у Німеччині кожне домогосподарство зобов'язане сортувати органіку, яка далі прямує на компостування або біогазові установки. За даними Eurostat, рівень переробки біовідходів у Німеччині перевищує 65% [43]. У Франції активно розвивається локальне компостування у школах, ресторанах, житлових кварталах. У Словенії впроваджено національну модель «zero waste», в рамках якої органіка збирається окремо та перетворюється на добриво для муніципального озеленення [44].

У Японії велика увага приділяється високотехнологічному компостуванню з автоматизованим контролем параметрів. Органічні відходи з харчової

промисловості зазвичай переробляються на кормові добавки або енергію [45]. У Південній Кореї заборонено захоронення харчових відходів з 2005 року. У містах діють системи збору органіки з оплатою за кілограм згенерованих відходів, що стимулює скорочення їх утворення.

Ці приклади демонструють, що ефективне управління органічними відходами можливе лише за умови поєднання законодавчої бази, інфраструктурної готовності, технологічних інновацій та активної участі громадян. Успішні моделі свідчать про те, що органіка — це не проблема, а ресурс, який за належного підходу може стати основою для сталого розвитку.

2.3. Інтеграція у ринок відходів ЄС та європейську систему управління відходами

Інтеграція України у ринок відходів Європейського Союзу (ЄС) та адаптація до європейської системи управління відходами є важливим кроком на шляху до сталого розвитку та екологічної безпеки. Цей процес включає вивчення нормативно-правової бази ЄС, впровадження передових технологій та методів управління відходами, а також подолання викликів, пов’язаних з адаптацією до європейських стандартів.

Одним з ключових аспектів інтеграції є вивчення та адаптація до нормативно-правової бази ЄС у сфері управління відходами. Основними документами, що регулюють цю сферу, є Директива 2008/98/ЄС про відходи [41], яка встановлює основні принципи та вимоги до управління відходами, включаючи ієрархію відходів, принципи “забруднювач платить” та розширену відповідальність виробника. Важливим аспектом є також вимоги щодо переробки, утилізації та зменшення обсягів відходів, що підлягають захороненню.

Європейські країни мають багатий досвід у впровадженні передових технологій та методів управління відходами. Серед них можна виділити механіко-біологічну обробку, термічну утилізацію, компостування та анаеробне

зброджування. Успішні приклади впровадження систем роздільного збору та переробки відходів у таких країнах, як Німеччина, Швеція та Нідерланди, демонструють ефективність цих підходів у зменшенні обсягів відходів, що підлягають захороненню, та збільшенні частки перероблених матеріалів.

Інтеграція у ринок відходів ЄС має численні економічні та екологічні вигоди. Залучення інвестицій у розвиток інфраструктури управління відходами, створення нових робочих місць та зменшення негативного впливу на довкілля є лише деякими з них. Крім того, інтеграція сприяє розвитку національної економіки та підвищенню рівня екологічної свідомості населення.

Процес інтеграції не обходиться без викликів та перешкод. Основними проблемами є недостатня розвиненість інфраструктури, відсутність належного фінансування та низький рівень обізнаності населення щодо важливості роздільного збору та переробки відходів. Для подолання цих викликів необхідно розробити національну стратегію управління відходами, залучити міжнародних інвесторів та донорів, провести інформаційно-просвітницькі кампанії та впровадити стимули для підприємств, що займаються переробкою відходів.

Запланована реформа у сфері управління відходами в Україні не лише відповідає вимогам законодавства Європейського Союзу, але й враховує національні особливості, включаючи економічні, інституційні та ринкові реалії. Водночас ключові елементи, такі як класифікація відходів, вимоги до учасників системи та принципи її функціонування, мають бути гармонізовані з європейськими стандартами. Це забезпечить правову сумісність та полегшить інтеграцію українських підприємств і установ у єдиний європейський простір поводження з відходами, сприяючи ефективній комунікації з міжнародними партнерами на основі уніфікованих правових норм [46].

На глобальному рівні більшість твердих побутових відходів досі утилізується шляхом захоронення. За оцінками міжнародних організацій, близько 37% усіх відходів потрапляє на полігони, з яких лише 8% — на контрольовані санітарні звалища, обладнані системами збору біогазу. Приблизно 31% відходів скидається на відкриті неконтрольовані сміттєзвалища, що створює

серйозні екологічні ризики. Лише 19% відходів підлягає переробці або компостуванню, а ще 11% — спалюється з метою остаточної утилізації.

Сучасні методи екологічно безпечної утилізації, такі як контрольоване захоронення або високотехнологічна переробка, переважно застосовуються в країнах із високим або вище середнього рівнем доходу. У державах із низьким рівнем доходу переважає практика відкритого скидання: до 93% відходів у таких країнах не проходить жодної обробки, тоді як у країнах із високим рівнем доходу цей показник становить лише близько 2%.

Регіональний аналіз свідчить, що понад половину відходів відкрито скидають у таких регіонах, як Близький Схід і Північна Африка, Африка на південь від Сахари та Південна Азія. У країнах із рівнем доходу вище середнього найвищий відсоток відходів (приблизно 54%) потрапляє на полігони. У країнах із високим рівнем доходу цей показник знижується до 39%, при цьому 36% відходів переробляється або компостується, а 22% — спалюється. Спалювання, як правило, застосовується в країнах з обмеженими земельними ресурсами, високою щільністю населення та розвиненою інфраструктурою.

Рис.2.5. Глобальна обробка та утилізація відходів, %

За оцінками міжнародних організацій [47], глобальні викиди парникових газів, пов’язані з обробкою та утилізацією твердих побутових відходів, становили приблизно 1,6 мільярда тонн еквіваленту CO_2, що дорівнює близько 5% загального обсягу світових викидів. Основним джерелом цих викидів є

захоронення відходів на відкритих полігонах без належної інфраструктури для збору звалищного газу. Значну частку викидів — майже половину — формують харчові відходи. За відсутності суттєвих змін у підходах до управління відходами, прогнозується зростання викидів до 2,38 мільярда тонн CO_2-еквіваленту щорічно до 2050 року.

У більшості країн світу управління твердими побутовими відходами є сферою відповідальності місцевих органів влади. Близько 70% держав мають спеціалізовані установи, що відповідають за формування політики та здійснення регуляторного контролю у цій сфері. Приблизно дві третини країн прийняли спеціальні законодавчі акти щодо поводження з ТПВ, однак рівень їх реалізації суттєво варіюється. Центральні уряди, як правило, не беруть безпосередньої участі в наданні послуг, обмежуючись регуляторними функціями та фінансовими трансфертами. Близько 70% послуг з управління відходами здійснюються місцевими органами влади, з яких половина — державними установами, а третина — у форматі державно-приватного партнерства. Водночас ефективність таких партнерств залежить від наявності чітких стимулів та механізмів контролю, що не завжди забезпечується.

В Україні контроль за дотриманням вимог у сфері поводження з відходами здійснює Державна екологічна інспекція — центральний орган виконавчої влади, відповідальний за реалізацію державної політики у сфері охорони довкілля та раціонального використання природних ресурсів. На місцевому рівні контрольні функції покладено на органи місцевого самоврядування, виконавчі органи рад, а також громадських інспекторів з благоустрою. Громадський контроль реалізується через діяльність екологічних інспекторів, які діють відповідно до чинного законодавства.

Фінансування систем управління ТПВ залишається одним із найскладніших аспектів, особливо в частині покриття операційних витрат. У країнах з високим рівнем доходу витрати на повний цикл управління відходами (збір, транспортування, обробка, утилізація) перевищують 100 доларів США за тонну. У країнах з низьким рівнем доходу ці витрати становлять у середньому

близько 35 доларів за тонну, однак саме ці країни стикаються з найбільшими труднощами у відшкодуванні витрат. Значну частину витрат становить транспортування — від 20 до 50 доларів за тонну.

Рівень відшкодування витрат на послуги з управління відходами суттєво залежить від економічного розвитку країни. У країнах з низьким рівнем доходу середня плата користувача становить близько 35 доларів на рік, тоді як у країнах з високим рівнем доходу — до 170 доларів. Повне або майже повне покриття витрат зазвичай досягається лише в економічно розвинених країнах. Моделі тарифікації можуть бути як фіксованими, так і змінними, залежно від типу користувача. Як правило, близько половини інвестиційних витрат на розвиток інфраструктури покривається органами місцевого самоврядування, тоді як решта фінансується за рахунок державних субсидій та приватного сектору [48].

Таблиця 2.1

Аналіз управління відходами в Україні та Європі

Показники	Україна	Європа
1	2	3
Обсяг відходів, що генеруються на душу населення, т/рік	500-600	400-500
Відсоток відходів, що утилізуються, %	10-15	50-60
Основні методи утилізації	Спалювання, захоронення, переробка	Переробка, компостування, спалювання
Законодавство в галузі поводження з відходами	Закон України "Про управління відходами" (2023 р.)	Директива ЄС 2008/98/ЄС про відходи (2008 р.)
Інвестиції в галузь поводження з відходами, млрд грн/рік	1-2	10-12
Проблеми	Недостатня культура поводження з відходами, недостатній розвиток переробної галузі, недосконале законодавство	Нерівномірний розвиток галузі в різних країнах, недостатня координація дій на міжнародному рівні

Інтеграція України у ринок відходів ЄС та адаптація до європейської системи управління відходами є важливим кроком на шляху до сталого розвитку та екологічної безпеки. Вивчення нормативно-правової бази ЄС, впровадження передових технологій та методів управління відходами, а також подолання викликів, пов'язаних з адаптацією до європейських стандартів, дозволяють забезпечити ефективне управління відходами та зменшити їхній негативний вплив на довкілля.

Інтеграція України до Європейського Союзу передбачає не лише політичну та економічну адаптацію, а й глибоку трансформацію екологічної політики, зокрема у сфері управління відходами. Одним із ключових напрямів цієї трансформації є гармонізація національного законодавства та практик з вимогами Рамкової директиви ЄС 2008/98/ЄС про відходи, яка встановлює ієрархію поводження з відходами, принципи розширеної відповідальності виробника, вимоги до роздільного збору та цілі щодо переробки.

1. Законодавча адаптація

Україна вже здійснила низку кроків у напрямі адаптації до європейських стандартів:

- прийнято Закон України «Про управління відходами» (2022), який базується на принципах європейського права;
- розроблено Національну стратегію управління відходами до 2030 року, що передбачає поступове зменшення обсягів захоронення та розвиток інфраструктури для переробки;
- впроваджуються механізми розширеної відповідальності виробника (EPR) у сфері упаковки, електроніки, батарей тощо.

2. Міжнародна підтримка та проєкти

Інтеграційні процеси активно підтримуються міжнародними партнерами. Зокрема, у 2024 році стартувала шведсько-українська ініціатива «WM4U – Посилення управління побутовими відходами в Україні», яка реалізується у співпраці з Avfall Sverige та SALAR International. Програма передбачає:

- розробку регіональних планів управління відходами;

- навчання фахівців;
- впровадження пілотних проєктів у громадах

Крім того, в межах програми Ukraine2EU, Європейський Союз надає стратегічну, експертну та фінансову підтримку реформам у сфері поводження з відходами, зокрема у Київській та Львівській областях

3. Виклики та перспективи

Україна успадкувала від радянської системи модель управління відходами, орієнтовану переважно на захоронення. Станом на 2024 рік понад 90% побутових відходів в Україні все ще захоронюється, що суперечить європейським екологічним стандартам

. Водночас, завдяки реформам, з’являються перші позитивні зрушення:

- розвиток інфраструктури роздільного збору;
- запуск муніципальних програм компостування;
- зростання обізнаності населення щодо сортування та повторного використання.

4. Значення для дослідження

У цьому контексті розроблення нових технологій утилізації органічних відходів, зокрема з використанням електричних компостерів, є не лише актуальним, а й стратегічно важливим.

Висновки до розділу 2

У розділі 2 було проведено всебічний аналіз правових механізмів та європейських імперативів у сфері управління відходами. Зокрема, було розглянуто наступні аспекти:

1. Ключові принципи управління відходами в країнах Європи:

- Вивчено основні принципи та підходи до управління відходами, що застосовуються в країнах Європи.
- Досліджено принципи “забруднювач платить” та розширеної відповідальності виробника, які є основою європейської системи управління відходами.

2. Інтеграція у ринок відходів ЄС та європейську систему управління відходами:

- Розглянуто процес інтеграції України у ринок відходів ЄС та адаптацію до європейської системи управління відходами.
- Проаналізовано нормативно-правову базу ЄС у сфері управління відходами, включаючи основні директиви та регламенти.
- Вивчено передові технології та методи управління відходами, що використовуються в країнах ЄС, а також успішні приклади впровадження систем роздільного збору та переробки відходів.

Таким чином, у розділі було розглянуто правові механізми та європейські імперативи у сфері управління відходами, що дозволяє зробити висновки щодо необхідності впровадження комплексних підходів для забезпечення ефективного управління відходами та зменшення їхнього негативного впливу на довкілля.

РОЗДІЛ 3
МЕТОДОЛОГІЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІЖЕННЯ

3.1. Методологія теоретичного дослідження

Мета цього дослідження полягає в розробці інноваційної технології компостування органічних відходів за допомогою електричного компостера, яка дозволить ефективно переробляти відходи та отримувати цінний продукт – органічне добриво.

Актуальність дослідження обумовлена зростаючою потребою у зменшенні обсягів органічних відходів на звалищах, підвищенням родючості ґрунтів та розвитком екологічно чистих технологій.

Методологія дослідження включає в себе теоретичний аналіз, експериментальні дослідження та математичне моделювання.

В результаті проведення дослідження буде розроблена ефективна технологія компостування органічних відходів, яка може бути широко застосована в різних галузях.

Теоретична частина дослідження базується на системному аналізі, математичному моделюванні та узагальненні наукової літератури. Основні етапи теоретичного дослідження:

1. Аналіз наукових джерел і технологій
    - Огляд існуючих методів переробки органічних відходів.
    - Аналіз електричних компостерів у контексті ефективності, швидкості розкладання та екологічних аспектів.
    - Визначення оптимальних умов для компостування.
2. Порівняльний аналіз альтернативних методів компостування
    - Визначення ключових параметрів ефективності
    - Порівняння електричного компостера з традиційним аеробним компостуванням, вермикомпостуванням та анаеробним розкладанням.

Ефективне поводження з органічними відходами є одним із найактуальніших завдань сучасності. Зростання міст, зміна споживчих звичок та необхідність збереження навколишнього середовища вимагають пошуку нових, більш ефективних та екологічно чистих методів утилізації органічних відходів.

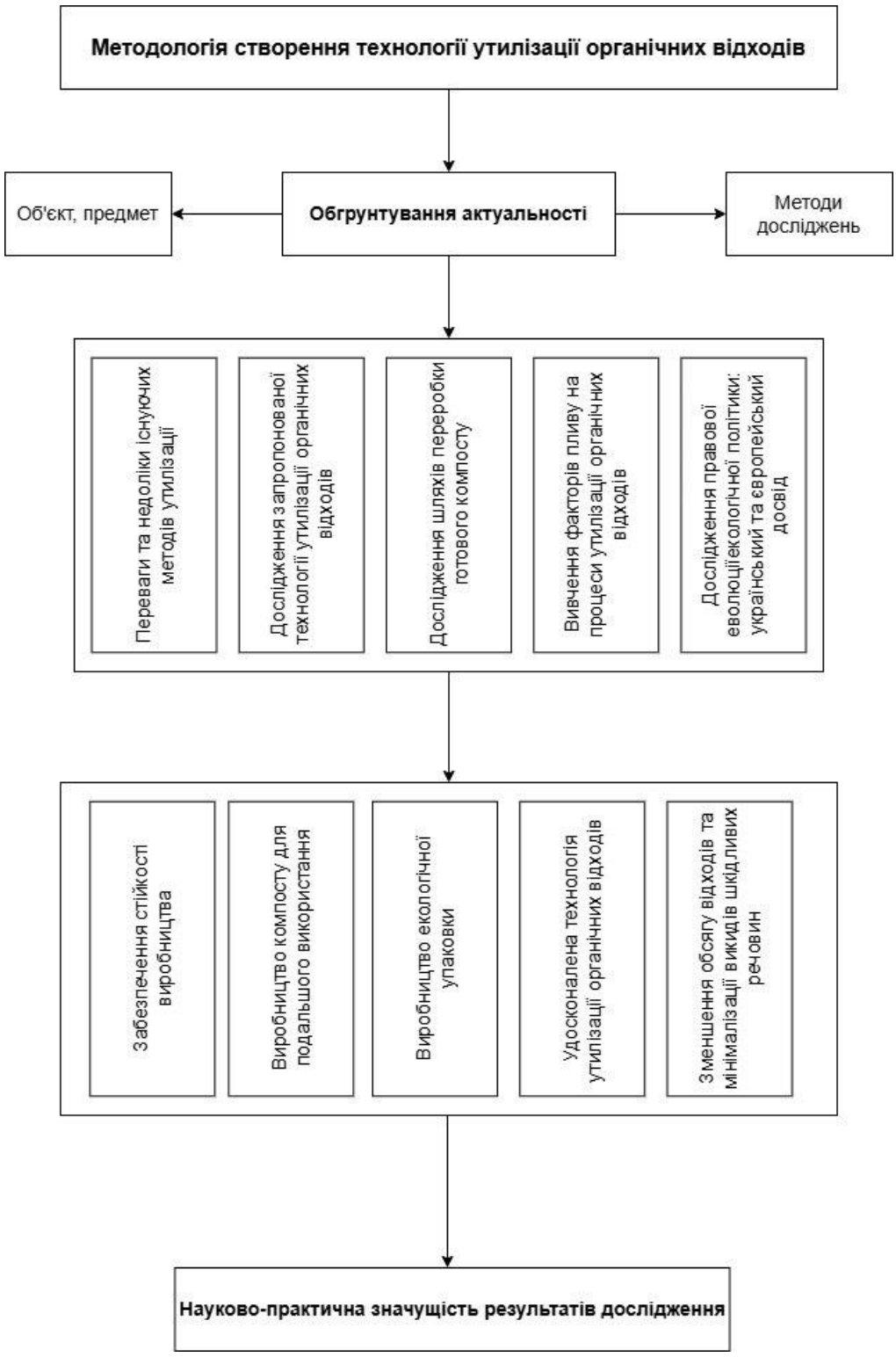


Рис. 3.1. Методологія дисертаційного дослідження

Також методологія включає:

- Економічна оцінка технології

Розрахунок витрат: Визначити всі витрати, пов’язані з виробництвом компосту, включаючи витрати на електроенергію, воду, матеріали та оплату праці.

Розрахунок доходів: Оцінити потенційні доходи від продажу компосту, біопалива або інших продуктів, отриманих в результаті переробки органічних відходів.

Аналіз економічної ефективності: Провести економічний аналіз технології для визначення її рентабельності.

- Екологічна оцінка технології

Оцінка впливу на довкілля: Провести оцінку впливу технології на довкілля, включаючи викиди парникових газів, забруднення ґрунту та водних ресурсів.

Порівняння з традиційними методами утилізації: Порівняти екологічні наслідки запропонованої технології з традиційними методами утилізації органічних відходів (звалища, спалювання).

Дане дослідження має вагоме методологічне та міждисциплінарне значення, оскільки пропонує нові підходи до вирішення актуальної проблеми управління відходами, що є критично важливою як у контексті сталого розвитку, так і в межах екологічної безпеки. Його результати можуть бути корисними для розвитку кількох наукових напрямів, зокрема екології, урбаністики, економіки природокористування та інженерії довкілля.

Основні аспекти наукової новизни та методологічної цінності включають:

- Комплексний системний підхід: У дослідженні підкреслюється важливість інтегрованого підходу до управління відходами, що враховує взаємозв’язки між екологічними, соціальними та економічними чинниками. Такий підхід дозволяє формувати ефективні стратегії на основі аналізу всієї системи поводження з відходами.
- Розробка нових аналітичних інструментів і моделей: У межах дослідження можуть бути запропоновані інструменти для оцінки ефективності

функціонування систем управління відходами, а також моделі прогнозування обсягів утворення відходів і вибору оптимальних сценаріїв їх обробки.

- Інтеграція інноваційних технологій: Аналіз можливостей впровадження сучасних технологічних рішень — таких як електронні компостери, автоматизовані системи сортування, цифрові платформи для моніторингу потоків відходів — сприяє розвитку технологічного потенціалу галузі.
- Формування наукової бази для подальших досліджень: Отримані результати можуть слугувати основою для подальших емпіричних і прикладних досліджень, зокрема у сфері екологічного планування, оцінки життєвого циклу продукції (LCA) та розробки політик у сфері циркулярної економіки.

Таким чином, дослідження не лише розширює наукове розуміння проблеми, а й створює передумови для практичного застосування результатів у сфері екологічного управління.

Розрахунок екологічного ефекту від технології утилізації органічних відходів

Для оцінки екологічного ефекту технології електричного компостера проведемо розрахунки з урахуванням:

• Зменшення викидів парникових газів (CO_2, CH_4, N_2O)

• Енергетичне споживання та його вплив на довкілля

• Переробку органічних відходів та зменшення обсягів сміттєзвалищ

• Аналіз життєвого циклу (LCA) технології

3.2. Методологія експериментального дослідження

Експериментальна частина дослідження спрямована на перевірку теоретичних моделей та аналіз ефективності роботи електричного компостера в реальних умовах.

1. Експериментальна установка

Дослідження проводяться на лабораторній установці електричного компостера, що містить такі основні компоненти:

- Корпус із теплоізоляцією для мінімізації тепловтрат.
- Нагрівальний елемент для підтримання оптимальної температури компостування.
- Вентиляційно-фільтраційна система для усунення запахів.
- Механізм перемішування для рівномірного розкладання органіки.
- Контрольна панель для збору даних щодо температури, вологості, рівня кисню та часу розкладання.

2. Методи збору та аналізу даних

Збір експериментальних даних здійснюється шляхом реєстрації таких параметрів:

- Температурний режим у різних точках компостера.
- Швидкість деградації органічних речовин за допомогою вимірювання маси залишкового матеріалу.

3. Методологія проведення експериментів

Експерименти поділяються на три групи:

1. Дослідження впливу температури
   - Визначення оптимальної температури розкладання.
   - Порівняння швидкості розкладання при різних температурах.
   - Вплив температури на склад кінцевого компосту.
2. Вплив типу органічних відходів
   - Випробування різних типів органічної маси
   - Аналіз впливу різних відходів на швидкість компостування.
   - Визначення оптимальних співвідношень вуглець-азот (C/N).

4. Обробка експериментальних результатів

3.3. Математичне моделювання процесів утилізації органічних відходів

Побудова математичної моделі, що описує динаміку зміни відношення початкової маси харчових відходів до зменшеної маси цих відходів під час роботи електричного компостера.

Чинники, що впливають на процес компостування:

- Температура: впливає на швидкість біохімічних реакцій.
- Вологість: надлишок або нестача вологи уповільнює процес.
- Аерація: доступ кисню необхідний для аеробного розкладу.
- Склад сировини: співвідношення вуглецю до азоту (C:N), наявність білків, жирів, крохмалю.
- Мікробіологічна активність: наявність мікроорганізмів, що розкладають органіку.
- Час обробки: чим довше триває процес, тим менше залишається маси.

Уведемо позначення:

m_0 – початкова маса харчових відходів,

$m_{\text{с}}$ – маса сухої (без вологи) частини відходів,

t – час (у год.),

$m(t)$ – маса відходів у момент часу t,

$m_{\text{в}}(t)$ – маса вологи, що міститься у відходах у момент часу t,

V_0 – початковий об’єм відходів,

$V(t)$ – об’єм відходів у момент часу t,

ρ – густина води,

$S(t)$ – площа поверхні відходів у момент часу t,

$h(t)$– вологість відходів у момент часу t: $h(t) = \frac{m(t) - m_{\text{с}}}{m_0}$,

h_0 – початкова вологість відходів: $h_0 = \frac{m_{\text{в}}(0)}{m_0} = \frac{m_0 - m_{\text{с}}}{m_0}$,

T– температура електричного компостера

Для створення математичної моделі спиратимемося на таке припущення. Оскільки волога з тіла випаровується через його поверхню, то природно вважати, що швидкість $\frac{dV}{dt}$ зменшення об'єму відходів у момент часу t пропорційна площі поверхні відходів.

Складаємо диференціальне рівняння

$$\frac{dV}{dt} = -k_1 S, \tag{3.1}$$

де $k_1 -$ коефіцієнт пропорційності, причому k_1>0. Ураховуючи, що об'єм виражається в кубічних одиницях, а площа – в квадратних, то рівняння (1) можна замінити рівнянням

$$\frac{dV}{dt} = -k_2 V^{\frac{2}{3}}, \tag{3.2}$$

де $k_2 -$ новий коефіцієнт пропорційності (k_2>0).

Рівняння (2) є диференціальним рівнянням з відокремлюваними змінними. Проінтегруємо його:

$$\frac{dV}{V^{\frac{2}{3}}} = -k_2 dt, \tag{3.3}$$

$$3V^{\frac{1}{3}} = -k_2 t + C,\ C - \text{довільна стала.}$$

Для визначення сталої C ураховуємо початкову умову $V(t) = V_0$:

$$3V_0^{\frac{1}{3}} = 0 + C\ . \tag{3.4}$$

Отже,

$$3V^{\frac{1}{3}} = -k_2 t + 3V_0^{\frac{1}{3}}, \tag{3.5}$$

звідки отримуємо

$$V = \left(V_0^{\frac{1}{3}} - k_3 t\right)^3, \tag{3.6}$$

де $k_3 = \frac{k_2}{3}$.

Тоді маса вологи у момент часу t визначається за формулою

$$m_{\text{в}}(t) = \rho\left(V_0^{\frac{1}{3}} - k_3 t\right)^3, \tag{3.7}$$

відповідно формула

$$m(t) = m_{\text{с}} + m_{\text{в}}(t) \tag{3.8}$$

для обчислення маси відходів у момент часу t набуває вигляду

$$m(t) = m_c + \rho\left(V_0^{\frac{1}{3}} - k_3 t\right)^3, \quad (3.9)$$

Запишемо формулу (3) з урахуванням, що $V_0 = \frac{h_0 m_0}{\rho}$. Маємо

$$m(t) = m_c + \rho\left(\left(\frac{h_0 m_0}{\rho}\right)^{\frac{1}{3}} - k_3 t\right)^3, \quad (3.10)$$

або

$$m(t) = m_c + \rho\frac{m_0}{\rho}\left(h_0^{\frac{1}{3}} - \frac{\rho}{m_0}k_3 t\right)^3. \quad (3.11)$$

Позначимо сталу $\frac{\rho}{m_0}k_4$ як k, формула (3) для визначення маси відходів залежно від часу t набуває вигляду

$$m(t) = m_c + m_0\left(h_0^{\frac{1}{3}} - kt\right)^3. \quad (3.12)$$

Проаналізуємо функцію $m(t)$, задану рівнянням (4). Ця функція є кубічною й спадною на всій області визначення. Наявність множника $\left(h_0^{\frac{1}{3}} - kt\right)^3$ дає змогу визначити максимальний час перебування відходів у контейнері під час його роботи

$$\left(h_0^{\frac{1}{3}} - kt_{max}\right)^3 = 0, \quad (3.13)$$

звідки отримуємо

$$t_{max} = \frac{h_0^{\frac{1}{3}}}{k}. \quad (3.14)$$

Зауважимо, що за значення $t > t_{max}$ з формули (4) випливає суперечлива нерівність $m(t) < m_c$.

Під час проведення експерименту вимірювалися відношення початкової маси відходів до маси відходів у різні моменти часу. Тому розділимо обидві частини співвідношення (4) на m_0 й у результаті отримаємо

$$\frac{m(t)}{m_0} = 1 - h_0 + \left((h_0)^{\frac{1}{3}} - kt\right)^3, \quad (3.15)$$

після чого перейдемо до оберненої рівності

$$\frac{m_0}{m(t)} = \frac{1}{1-h_0+\left((h_0)^{\frac{1}{3}}-kt\right)^3}, \quad (3.16)$$

Для зручності позначимо $\frac{m_0}{m(t)} = q(t)$. Отже,

$$q(t) = \frac{1}{1-h_0+\left((h_0)^{\frac{1}{3}}-kt\right)^3}. \quad (3.17)$$

З формули (6) випливає, що найбільше можливе зростання відношення початкової маси m_0 відходів до маси $m(t)$ дорівнює $\frac{1}{1-h_0}$ й досягається в момент часу $t_{max} = \frac{h_0^{\frac{1}{3}}}{k}$,

тобто

$$q_{max} = q(t_{max}) = q\left(\frac{h_0^{\frac{1}{3}}}{k}\right) = \frac{1}{1-h_0}. \quad (3.18)$$

Для визначення наближеного значення коефіцієнта k застосуємо такі міркування.

Нехай за заданої температури відомі відношення початкової маси відходів (m_0) до маси відходів $m(t_i)$ у момент часу $t_i, i = 1; 2; \dots; l$:

$$\frac{m_0}{m(t_i)} = q_i \quad (3.19)$$

й початкова вологість h_0 (у відсотках). Згідно формули (6) повинні справджуватися рівності

$$q(t_i) = \frac{1}{1-h_0+\left((h_0)^{\frac{1}{3}}-kt_i\right)^3}, i = 1; 2; \dots; l. \quad (3.20)$$

Проте у нашому випадку значення $q(t_i)$ містять похибки, адже вони визначені під час експерименту наближено. Для визначення значення коефіцієнта k для кожної серії експериментальних даних за заданої температури (80 °C, 120 °C, 150 °C) електричного компостера застосуємо метод найменших квадратів. Формулу (6) запишемо у вигляді

$$y = kt, \quad (3.21)$$

де $y(t) = (h_0)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{1}{q(t)} - 1 + h_0\right)^{\frac{1}{3}}$. За методом найменших квадратів отримуємо, що

$$k \approx \frac{\sum_{i=1}^{l} \left((h_0)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{1}{q(t_i)} - 1 + h_0 \right)^{\frac{1}{3}} \right) \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{l} {t_i}^2}. \quad (3.22)$$

Підставивши в формулу (7) визначене за формулою (8) наближене значення коефіцієнта k, отримаємо формулу для визначення відношення мас $q(t) = \frac{m_0}{m(t)}$ у будь-який момент часу $t \in [0; t_{max}]$.

Вологість відходів у моменти часу $t_1; t_2; ,,,; t_l$ можна визначити за формулами:

$$h(t_i) = \frac{1}{q(i)} - 1 + h_0, i = 1; 2; \dots; l. \quad (3.23)$$

У випадку, коли потрібно розрахувати значення $q(t)$ за температури електричного компостера, що не дорівнює жодній із температур 80 °C, 120 °C або 150 °C, припускаємо, що між температурою T електричного компостера та коефіцієнтом k існує лінійний зв'язок: $k = aT + b$. Застосувавши метод найменших квадратів для значень $T: 80;\ 120;\ 150$ та $k: 0{,}1349; 0{,}1779; 0{,}2103$ (див. приклади 1–3), отримаємо залежність

$$k = 0{,}0011T + 0{,}0487, \quad (3.24)$$

зокрема за температури $T = 80$ °C $k = 0{,}1037$, а за температури $T = 100$ °C – $k = 0{,}1587$.

Розглянемо приклади реалізації запропонованої математичної моделі за певних значень температур роботи компостера та за фіксованої початкової вологості харчових відходів.

1. $t = 80°C$, $h_0 = 0{,}9$.

```
Початкові дані:
Температура  = 80.0
Вологість (%) = 90.0
Експериментальні значення відношення початкової маси відходів
до маси відходів, зменшеної за 1, 2 та 4 години:
m0/m1 = 1.5000     m0/m2 = 2.5000         m0/m4 = 5.4000
Розраховані за експериментальними даними вологості (%)
відходів через 1, 2 та 4 години:
h(1)експ = 56.6667     h(2)експ = 30.0000    h(4)експ = 8.5185
Розрахований за МНК коефіцієнт k = 0.1349
Розраховані за формулою, отриманою за МНК, значення відношення початкової маси відходів
до маси відходів, зменшеної за 1, 2 та 4 години:
m0/m(1) = 1.4857     m0/m(2) = 2.2893   m0/m(3) = 3.6169     m0/m(4) = 5.6389
Кількість годин, за які з відходів зникне волога:  7.1593
Розраховані вологості (%) відходів через 1, 2 та 4 години:
h(1) = 57.3091     h(2) = 33.6822   h(3) = 17.6476     h(4) = 7.7338
```

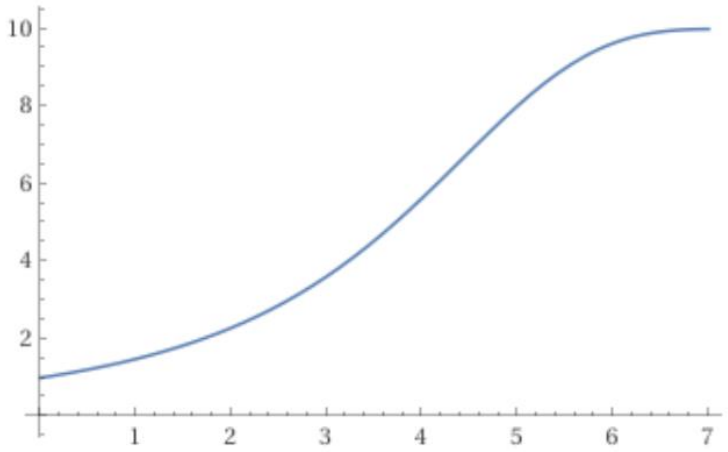


Рис.3.2. Реалізація запропонованої математичної моделі при $t = 80°C$, $h_0 = 0{,}9$.

2. $t = 120°C$, $h_0 = 0{,}9$.

```
Початкові дані:
Температура  = 120.0
Вологість (%) = 90.0
Експериментальні значення відношення початкової маси відходів
до маси відходів, зменшеної за 1, 2 та 4 години:
m0/m1 = 1.7000     m0/m2 = 3.2000         m0/m4 = 8.5000
Розраховані за експериментальними даними вологості (%)
відходів через 1, 2 та 4 години:
h(1)експ = 48.8235     h(2)експ = 21.2500    h(4)експ = 1.7647
Розрахований за МНК коефіцієнт k = 0.1779
Розраховані за формулою, отриманою за МНК, значення відношення початкової маси відходів
до маси відходів, зменшеної за 1, 2 та 4 години:
m0/m(1) = 1.6992     m0/m(2) = 3.0617   m0/m(3) = 5.5406     m0/m(4) = 8.5942
Кількість годин, за які з відходів зникне волога:  5.4268
Розраховані вологості (%) відходів через 1, 2 та 4 години:
h(1) = 48.8520     h(2) = 22.6611   h(3) = 8.0486     h(4) = 1.6358
```

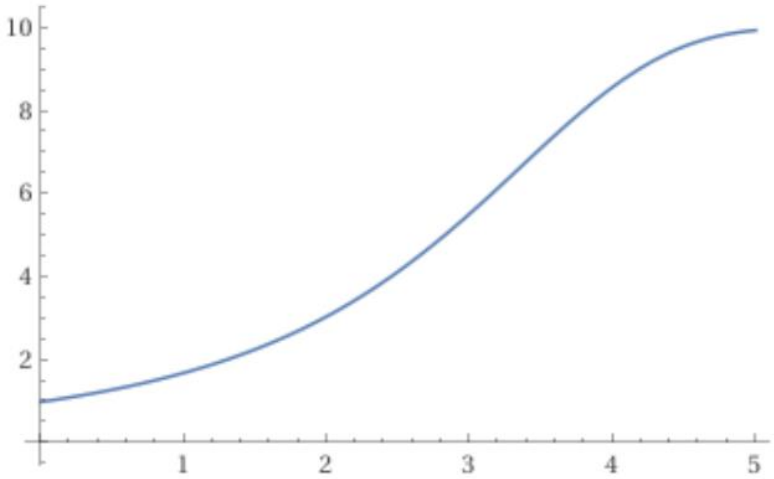


Рис.3.3. Реалізація запропонованої математичної моделі при $t = 120°C$, $h_0 = 0{,}9$

3. $t = 150°C$, $h_0 = 0{,}9$.

```
Початкові дані:
Температура  = 150.0
Вологість (%) = 90.0
Експериментальні значення відношення початкової маси відходів
до маси відходів, зменшеної за 1, 2 та 4 години:
m0/m1 = 1.9000     m0/m2 = 4.4000         m0/m4 = 9.7000
Розраховані за експериментальними даними вологості (%)
відходів через 1, 2 та 4 години:
h(1)експ = 42.6316     h(2)експ = 12.7273    h(4)експ = 0.3093
Розрахований за МНК коефіцієнт k = 0.2103
Розраховані за формулою, отриманою за МНК, значення відношення початкової маси відходів
до маси відходів, зменшеної за 1, 2 та 4 години:
m0/m(1) = 1.8845     m0/m(2) = 3.8209   m0/m(3) = 7.2767     m0/m(4) = 9.8122
Кількість годин, за які з відходів зникне волога:  4.5903
Розраховані вологості (%) відходів через 1, 2 та 4 години:
h(1) = 43.0636     h(2) = 16.1721   h(3) = 3.7424     h(4) = 0.1914
```

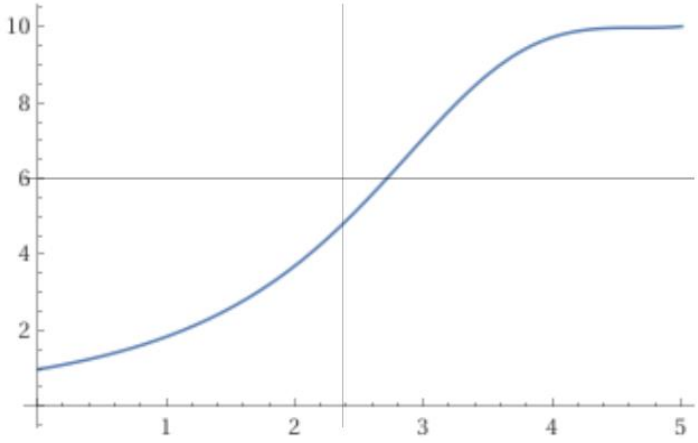


Рис.3.4. Реалізація запропонованої математичної моделі при $t = 150°C$, $h_0 = 0{,}9$

4. $t = 50°C$, $h_0 = 0{,}9$.

```
Початкові дані:
Температура  = 50.0
Вологість (%) = 90.0
Експериментальні значення відношення початкової маси відходів
до маси відходів, зменшеної за 1, 2 та 4 години:ВІДСУТНІ
m0/m1 = 1.0000     m0/m2 = 1.0000         m0/m4 = 1.0000
Розраховані за експериментальними даними вологості (%)- ВІДСУТНІ
відходів через 1, 2 та 4 години:
h(1)експ = 90.0000     h(2)експ = 90.0000    h(4)експ = 90.0000
Розрахований за МНК коефіцієнт k = 0.1037
Розраховані за формулою, отриманою за МНК, значення відношення початкової маси відходів
до маси відходів, зменшеної за 1, 2 та 4 години:
m0/m(1) = 1.3513     m0/m(2) = 1.8668   m0/m(3) = 2.6300     m0/m(4) = 3.7453
Кількість годин, за які з відходів зникне волога:  9.3104
Розраховані вологості (%) відходів через 1, 2 та 4 години:
h(1) = 64.0035     h(2) = 43.5674   h(3) = 28.0226     h(4) = 16.7001
```

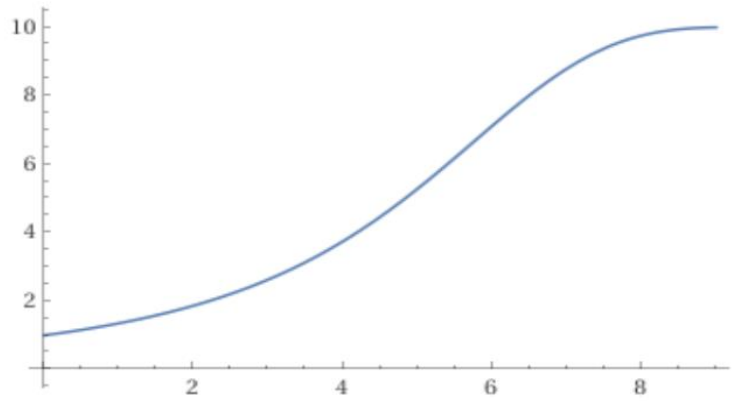


Рис.3.5. Реалізація запропонованої математичної моделі при $t = 50°C$, $h_0 = 0{,}9$

5. $t = 100°C$, $h_0 = 0{,}9$.

```
Початкові дані:
Температура  = 100.0
Вологість (%) = 90.0
Експериментальні значення відношення початкової маси відходів
до маси відходів, зменшеної за 1, 2 та 4 години:ВІДСУТНІ
m0/m1 = 1.0000     m0/m2 = 1.0000         m0/m4 = 1.0000
Розраховані за експериментальними даними вологості (%)- ВІДСУТНІ
відходів через 1, 2 та 4 години:
h(1)експ = 90.0000     h(2)експ = 90.0000    h(4)експ = 90.0000
Розрахований за МНК коефіцієнт k = 0.1587
Розраховані за формулою, отриманою за МНК, значення відношення початкової маси відходів
до маси відходів, зменшеної за 1, 2 та 4 години:
m0/m(1) = 1.5996     m0/m(2) = 2.6867   m0/m(3) = 4.6038     m0/m(4) = 7.3442
Кількість годин, за які з відходів зникне волога:  6.0837
Розраховані вологості (%) відходів через 1, 2 та 4 години:
h(1) = 52.5147     h(2) = 27.2210   h(3) = 11.7210     h(4) = 3.6163
```

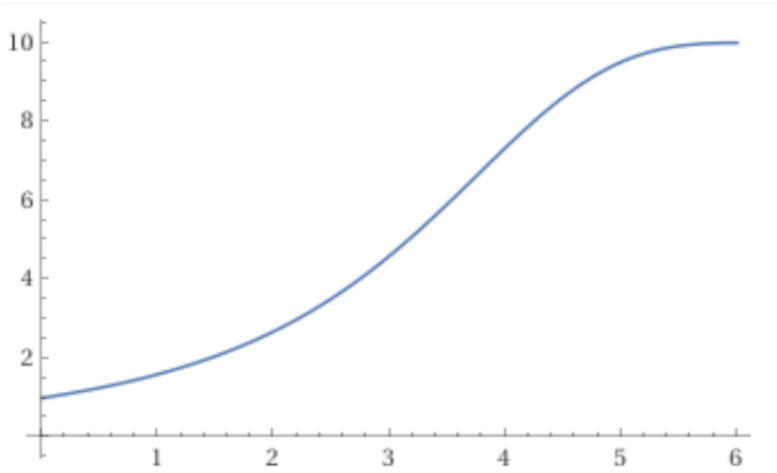


Рис.3.6. Реалізація запропонованої математичної моделі при $t = 100°C$, $h_0 = 0{,}9$

Порівняння отриманих результатів з експериментальними даними дає змогу зробити висновок, що запропонована математична модель достатньо якісно відображає динаміку зростання відношення початкової маси харчових відходів до зменшеної маси цих відходів під час роботи електричного компостера за заданої початкової вологості відходів та різних температур.

Висновок до розділу 3

У розділі 3 було детально розглянуто методологію дисертаційного дослідження, що включає теоретичні та експериментальні підходи, а також математичне моделювання процесів утилізації органічних відходів. Основні висновки цього розділу включають:

1. **Методологія теоретичного дослідження**: систематизовано та класифіковано дані про методи та технології управління відходами, застосовані в дослідженні.

2. **Методологія експериментального дослідження**:

- Підготовлено експериментальну базу для проведення досліджень з утилізації органічних відходів.
- Проведено експерименти з вивчення закономірностей процесів утилізації органічних відходів за допомогою різних технологій, таких як компостування та анаеробне зброджування.
- Досліджено фактори, що впливають на ефективність процесів утилізації, включаючи температуру, вологість та склад відходів.

3. **Математичне моделювання процесів утилізації органічних відходів**: розроблено математичну модель, що описує процеси утилізації органічних відходів, з урахуванням основних факторів, що впливають на ці процеси.

Таким чином, у розділі 3 було розглянуто комплексний підхід до дослідження методів та технологій управління відходами, що включає теоретичний аналіз, експериментальні дослідження та математичне моделювання.

РОЗДІЛ 4
РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

4.1. Розроблення технології утилізації органічних відходів

Одним із найпоширеніших методів утилізації органічних відходів є компостування. Під час компостування органічні речовини розкладаються природним шляхом, не викидаючи шкідливих речовин в атмосферу чи ґрунт. Компост можна використовувати як добриво, яке сприяє відновленню родючості ґрунту. Важливо тримати пропорцію у компості між азотом та вуглецем [49].

Термокомпостування – це процес розкладання органічних речовин за допомогою високих температур.

Електричний компостер є ефективним способом утилізації органічних відходів. При правильному використанні вага органічних відходів може зменшитися в кілька разів за короткий час.

Електричні компостери розроблені для компостування м'яких харчових відходів, таких як фрукти, овочі, кава та чай. Хоча деякі електронні компостери можуть компостувати кістки, олії, жири та молочні продукти, це може призвести до проблем, описаних вище.

Технологія утилізації харчових відходів в електронному компостері є сучасним та ефективним методом переробки органічних відходів. Цей процес складається з шести основних кроків, які забезпечують повний цикл компостування та отримання високоякісного кінцевого продукту. На рисунку 4.1 представлена схема технології утилізації харчових відходів в електронному компостері, Кожен етап детально описаний та ілюстрований для наочності. На рисунку 4.2 показано можливі варіанти використання кінцевого продукту компостування. Ці варіанти демонструють універсальність та екологічну цінність отриманого продукту.

Рис. 4.1. Схема технології утилізації харчових відходів

Рис. 4.2. Варіанти використання компосту

Принцип дії електричного компостера:

Розглянемо електричний компостер детальніше з технічної та інженерної точки зору, розібравши його основні складові, їхню роль у процесі компостування та принцип роботи.

Конструктивні та функціональні елементи електричного компостера

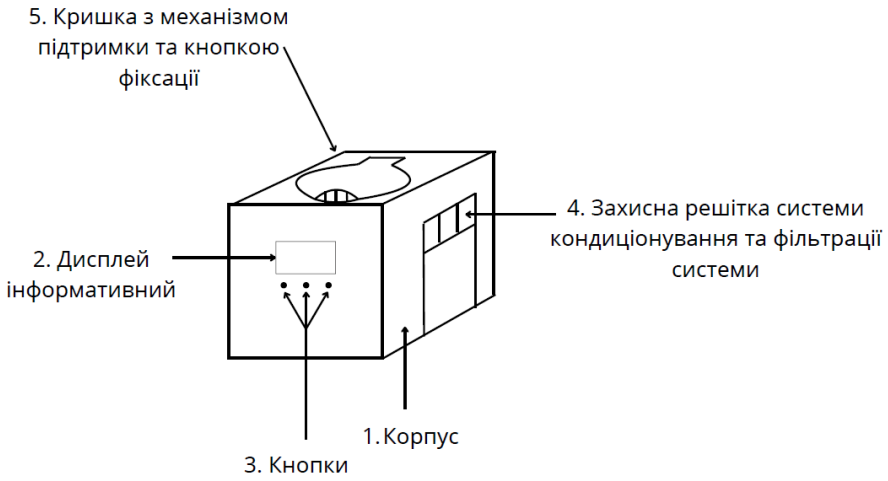


Рис. 4.3. Загальна схема електричного компостеру

1. Корпус

Матеріал: Виготовлений із термостійкого пластику або металу для витримування високих температур та механічних навантажень.

Функція: Захищає внутрішні компоненти, зберігає тепло і забезпечує герметичність процесу.

2. Завантажувальна кришка з механізмом підтримки та фіксації

Конструкція: Оснащена шарнірним механізмом, що утримує її у відкритому положенні, та кнопкою блокування для безпечного закриття.

Функція: Полегшує доступ до завантажувальної камери, запобігає викиду неприємних запахів, може мати ущільнювачі для герметизації.

3. Завантажувальна камера

Матеріал: з нержавіючої сталі.

Функція: Місце, куди завантажуються органічні відходи, повинна мати антипригарне покриття для запобігання налипанню залишків.

4. Нагрівальний елемент

Тип: плоский нагрівальний елемент.

Функція: підтримує високу температуру (50-80°C) для термічного розкладання, випаровує зайву вологу з відходів, усуває патогенні мікроорганізми та запахи.

5. Механізм перемішування

Конструкція: лопатевий змішувач або шнековий механізм, приводиться в дію електродвигуном.

Функція: забезпечує рівномірний розподіл маси всередині, запобігає утворенню грудок та ущільнень, прискорює процес розкладання, забезпечуючи аерацію матеріалу.

6. Вентиляційна та фільтраційна система

Компоненти: вентилятор для циркуляції повітря, вугільний фільтр для усунення запахів, система конденсації для збору вологи.

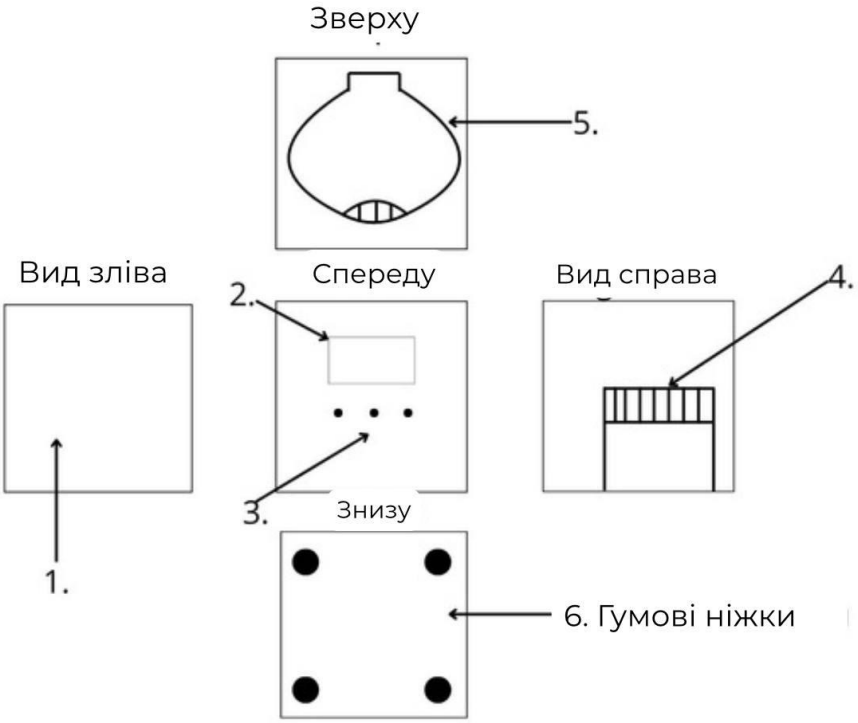
Функція: Відводить випари та гази, що утворюються в процесі компостування, мінімізує запахи завдяки вугільному фільтру, запобігає надмірному зволоженню внутрішньої камери.

7. Система управління (дисплей і кнопки)

Складові:

- Мікроконтролер (обробляє команди та контролює процес).
- Дисплей для відображення параметрів (температура, час роботи).
- Кнопки для вибору режимів роботи.

Функція: автоматичний контроль температури, запуск і зупинка процесу.



Задня сторона

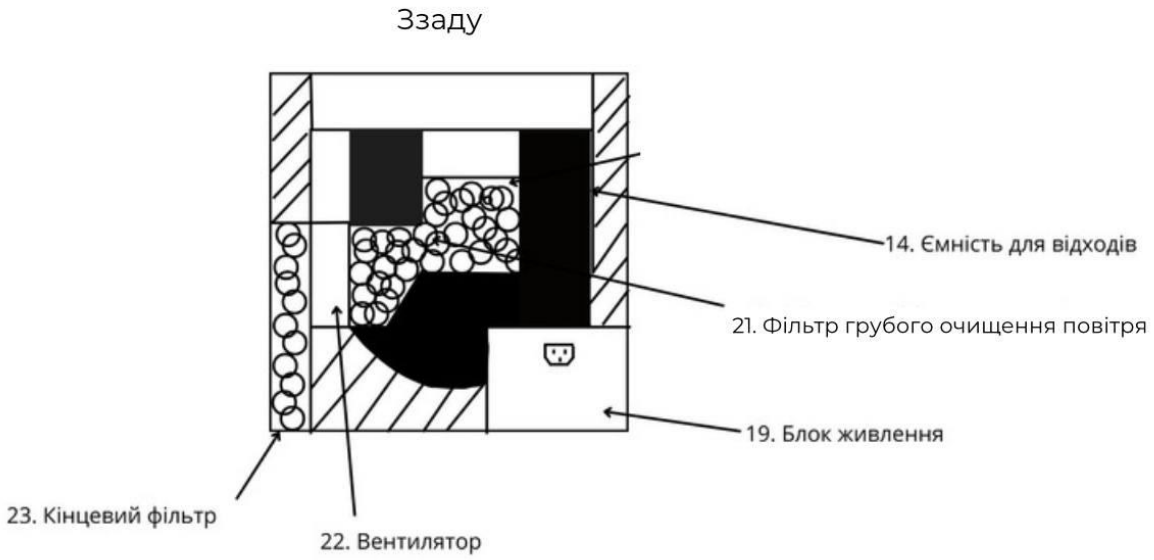


Рис. 4.4. Схема сторін електричного компостеру

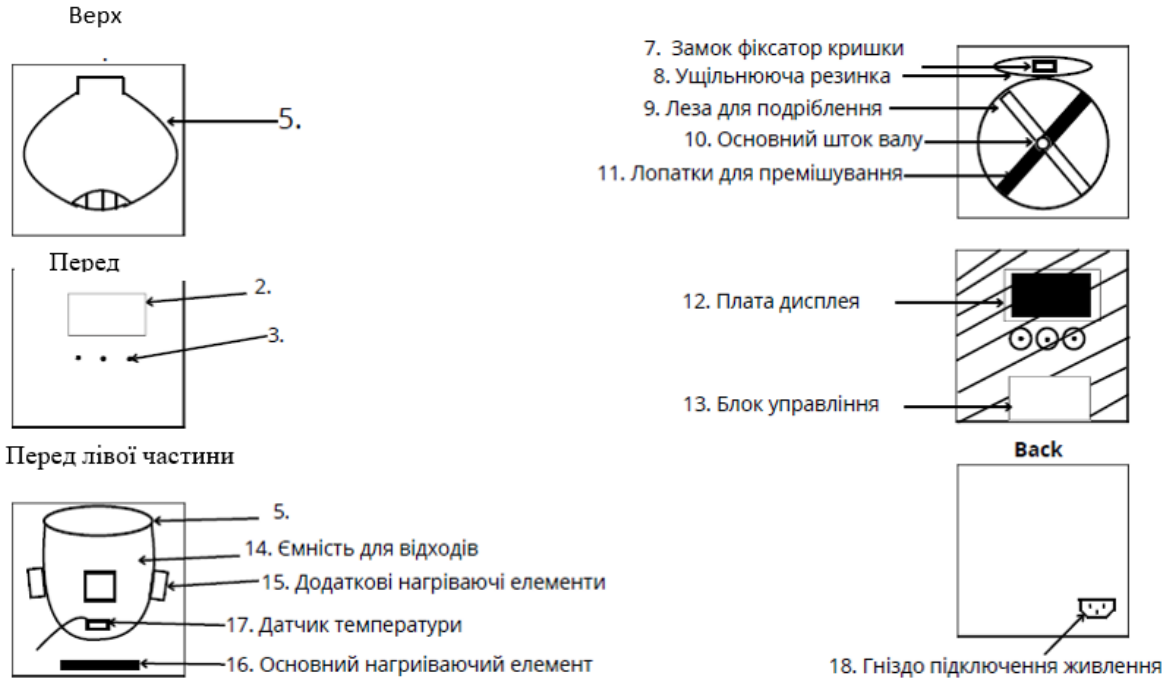


Рис. 4.5. Схема отворів електричного компостеру

Послідовність процесів роботи компостера.

1. Завантаження відходів через кришку в камеру.

2. Запуск процесу – користувач обирає програму через панель керування.

3. Нагрівання – нагріваючий елемент підігріває відходи, випаровуючи зайву вологу.

4. Перемішування – механізм рівномірно розподіляє масу та забезпечує аерацію.

5. Фільтрація повітря – система вентиляції усуває запахи та вологу.

6. Завершення процесу – після обробки виходить сухий, безпечний компост.

Що впливає на ефективність роботи?

1. Температура нагріву – занадто низька не випарить вологу, занадто висока може пошкодити корисні бактерії.

2. Частота перемішування – важливо, щоб маса прогрівалася рівномірно.

3. Ефективність вентиляції – якщо не відводити зайві гази, процес може уповільнитися.

4. Типи відходів – жирні чи дуже мокрі відходи потребують більше часу на переробку.

5. Фільтраційна система – має вчасно очищатися або замінюватися.

Для підвищення ефективності утилізації органічних відходів в електричному компостері рекомендується:

- Подрібнювати органічні відходи перед закладанням у компостер.
- Регулярно перемішувати органічні відходи в компостері.

Фактори, які можуть впливати на швидкість термокомпостування овочів окремо. Вони включають:

- Тип компостера: обертові барабанні компостери, як правило, компостують овочі швидше, ніж стаціонарні барабанні компостери.
- Розмір овочів: дрібні овочі компостують швидше, ніж великі.
- Вміст поживних речовин: овочі з високим вмістом поживних речовин, наприклад зелені овочі, компостуються швидше, ніж овочі з низьким вмістом поживних речовин, наприклад білі овочі.

Овочі містять більше вологи, ніж інші харчові відходи. Волога сприяє процесам бродіння та гниття, які є основними етапами термокомпостування. Таким чином, утилізація овочів окремо має проходити швидше, ніж утилізація овочів разом з іншими харчовими відходами, які містять менше вологи. Окрім того, овочі містять більше легкозасвоюваних поживних речовин, ніж інші харчові відходи. Ці поживні речовини необхідні для росту мікроорганізмів, які беруть участь у процесі термокомпостування. Таким чином, утилізація овочів окремо забезпечує більше поживних речовин для мікроорганізмів, що також сприяє більш швидкому компостуванню.

Нарешті, овочі містять менше жирів і олій, ніж інші харчові відходи. Жири і олії можуть ускладнювати процес компостування, оскільки вони можуть утворювати плівку, яка перешкоджає доступу повітря до органічних речовин. Таким чином, утилізація овочів окремо допомагає уникнути цих проблем, що також сприяє більш швидкому компостуванню.

Співвідношення азоту та вуглецю в компості:

1. Азот (зелений матеріал): лишайники, зелене листя (наприклад, трава), живі дерева (гілки, листя), кухонні відходи (фрукти, овочі, чайне листя).

2. Вуглець (коричневий матеріал): солома, сіно, сухе листя, газонний скошений матеріал, дерев'яна стружка.

Співвідношення:

Щоб компост був ефективним, бажано дотримуватися співвідношення азоту та вуглецю приблизно 25-30 часток вуглецю на 1 частину азоту (25:1 або 30:1). Це оптимальне співвідношення забезпечить правильний баланс для мікроорганізмів, що розкладають відходи.

Природні пришвидшувачі компосту:

1. Вершковий кефір чи йогурт: додає азот та допомагає утворювати корисні бактерії.

2. Чайна заварка: забезпечує азот та інші поживні речовини.

3. Кавова гуща: містить азот та стає хорошим природнім додатком.

4. Свіжий трав'яний матеріал: наприклад, трава, яку ви косите, містить багато азоту.

5. Фруктові та овочеві залишки: ці відходи додають азот та забезпечують різноманіття.

Вибір фільтру для електричного компостеру:

Одним із ключових компонентів електричного компостеру є фільтр, який забезпечує очищення повітря від неприємних запахів та шкідливих речовин. Вибір відповідного фільтру є критичним для забезпечення ефективної роботи компостеру та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Фільтри для електричних компостерів виконують важливу функцію очищення повітря, яке проходить через компостер під час процесу компостування. Вони допомагають зменшити концентрацію летких органічних сполук, які можуть викликати неприємні запахи, а також затримують дрібні частинки, що можуть бути шкідливими для здоров'я. Ефективність фільтру залежить від його здатності утримувати забруднювачі та забезпечувати чисте повітря на виході.

При виборі фільтру для електричного компостеру слід враховувати кілька важливих аспектів:

1. Ефективність очищення: Фільтр повинен забезпечувати високий рівень очищення повітря від запахів та шкідливих речовин.
2. Термін служби: Важливо враховувати термін служби фільтру та його здатність до регенерації або заміни.
3. Сумісність: Фільтр повинен бути сумісним з конструкцією компостеру та легко встановлюватися.

Вибір відповідного фільтру для електричного компостеру є важливим етапом у забезпеченні його ефективної роботи. Враховуючи ці критерії, можна забезпечити оптимальне очищення повітря та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище. Карбоновий фільтр, використовуваний в побутових електричних термокомпостерах, є частиною системи фільтрації, яка призначена для утримання запахів та забезпечення чистого виходу повітря. Основні характеристики карбонового фільтра включають:

1. Матеріал: карбонові фільтри виготовляються з активованого вугілля (активованого карбону), яке має велику поверхню забезпечуючи ефективне поглиблення запахів.

2. Поглиблення запахів: активований вугілля має властивість поглиблювати та утримувати запахові молекули в своїй пористій структурі. Це допомагає забезпечити ефективне усунення неприємних запахів.

3. Поверхнева область: велика поверхня карбонового фільтра дозволяє максимальною мірою використовувати його абсорбційні властивості.

4. Заміна та обслуговування: карбонові фільтри можуть вимагати періодичної заміни залежно від інтенсивності використання та рівня запахів. Деякі моделі термокомпостерів мають індикатори для вказівки необхідності заміни.

5. Легка заміна: багато побутових термокомпостерів розроблені так, щоб заміна карбонового фільтра була легкою та доступною для користувача. Зазвичай це вимагає видалення та заміни картриджа фільтра.

6. Ефективність: карбонові фільтри є ефективними у видаленні не тільки запахів, але й деяких шкідливих газів та забруднювачів.

Загальною метою карбонового фільтра є забезпечення чистого та беззапахового виходу повітря під час процесу компостування в електричному термокомпостері.

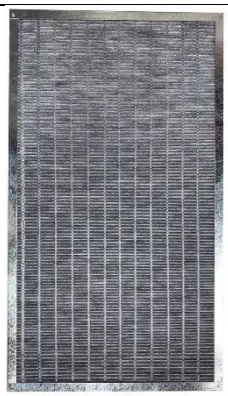
Таблиця 4.1

Типи фільтрів

№	Фото	Назва	Опис
1	2	3	4
1		Губчастий фільтр з карбоном для фільтра PowerLine 2052 та 2252	Картридж складається з пористої піни в якій затримуються частинки бруду, одночасно фільтруючий матеріал забезпечує велику колонізаційну бактерію на своїй поверхні. Картриджі багаторазового використання. - Піна тримає частинки механічні бруду - У порах колонізуються культури бактерій Картридж повністю просочений спеціальним активованим вугіллям з нейтральним pH. Адсорбує шкідливі речовини, барвники та залишки медикаментів. Через короткий проміжок часу картридж втратить свою адсорбуючу властивість, потім його необхідно замінити пінним картриджем. [50]
2		Фільтри для побутового утилізатору харчових відходів FOOD CYCLER	Нейтралізує неприємні запахи, що виникають в процесі переробки харчових відходів. Заміна вуглецевого фільтра є важливою для забезпечення відсутності запаху харчових відходів та комфортної роботи Food Cycler. Заміна вуглецевих фільтрів здійснюється після 120 годин використання. [51]
3		Очищувач повітря HEPA фільтр із секцією активованого вугілля посередині	Вугільна фільтрація працює шляхом адсорбції , під час якої забруднюючі речовини в рідині, що очищується, затримуються всередині парової структури вуглецевого субстрату. Підкладка складається з багатьох вуглецевих гранул, кожна з яких сама по собі є високопористою . У результаті підкладка має велику площу поверхні, на якій можуть затримуватися забруднення. Активоване вугілля зазвичай використовується у фільтрах, оскільки воно було оброблено, щоб мати набагато більшу площу поверхні, ніж необроблене вугілля. Один грам активованого вугілля має площу

			поверхні понад 3000 м 2 (32 000 кв. футів). [52]

продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
4		Повітряні вугільні фільтри для очищення повітря	Вугільні повітряні фільтри призначені для очищення повітря, що проходить крізь систему вентиляції та кондиціонування. Вони затримують забруднення різного типу: пил, комах, пилок, бактерії, алергени, а також запахи, подаючи у приміщення максимально очищене повітря. Цей фільтр ідеально підходить для використання в широкому спектрі сфер - від промислових установок хімічної та нафтохімічної галузей до побутових систем кондиціонування та очищення повітря. Його висока поглинаюча здатність забезпечує уловлення навіть найдрібніших часток органічних сполук, таких як молекули метанолу, бензину та інших шкідливих речовин. [53] Конструкція фільтра містить передфільтр, який допомагає затримати великі частки пилу та вологу, збільшуючи термін експлуатації виробу. Він працює ефективно лише при правильному монтажі, а комплектація включає в себе все необхідне для його належної роботи. [54]
5		Фільтри з активованим вугіллям	Фільтри компостних контейнерів поглинають і вловлюють запахи в компостних баках і зберігають вашу кухню свіжою та здоровою. Ці вугільні фільтри з активованим вугіллям є найкращим рішенням для природного та ефективного уловлювання запахів харчових відходів у приміщенні. Виготовлений з активованого вугілля, який забезпечує гарне поглинання та фільтрацію та допомагає ефективно затримувати запахи, водночас запобігаючи ферментації чи дозрілим фруктам і овочам. Достатня вентиляція життєвонеобхідна для процесу розкладання. Рекомендується міняти фільтр кожні 2-3 місяці для належного контролю запаху. [55]

6		Змінні фільтри з активованим вугіллям для електричног о кухонного компостера	Харчові компостери перетворюють харчові залишки та кухонні відходи на порошок, висушуючи та подрібнюючи. Ви можете використовувати цей порошок як добриво для ваших рослин або викинути його, щоб зменшити обсяг і запах вашого сміття. Всі витратні матеріали для фільтрів виготовлені з біорозкладних матеріалів. збирайте харчові відходи у відро протягом дня, а потім увімкніть машину перед сном. [56]

З метою забезпечення екологічної безпеки та зниження рівня запахів було проведено порівняльний аналіз різних типів фільтрувальних елементів (табл. 4.1). За результатами аналізу встановлено, що губчастий карбоновий фільтр має низку переваг, які зумовили його вибір для подальшого використання в конструкції термокомпостера:

1. Висока адсорбційна здатність активованого вугілля забезпечує ефективне поглинання летких органічних сполук, аміаку, сірководню та інших компонентів, що спричиняють неприємні запахи.

2. Пориста структура фільтра створює сприятливі умови для розвитку мікробіоти, що сприяє додатковому біологічному очищенню повітря.

3. Можливість регенерації та повторного використання фільтра знижує експлуатаційні витрати та підвищує загальну економічну ефективність системи.

4. Компактність і сумісність з конструкцією термокомпостера дозволяє інтегрувати фільтр без необхідності вносити суттєві зміни до корпусу або вентиляційної системи.

Таким чином, вибір карбонового фільтра є науково обґрунтованим з позицій екологічної доцільності, технологічної ефективності та економічної раціональності, що відповідає загальній концепції сталого управління органічними відходами.

Ефективність процесу компостування значною мірою залежить від створення сприятливих умов для життєдіяльності мікроорганізмів, які здійснюють біологічне розщеплення органічної маси. Одним із критичних факторів є стабільність вологості компостної маси. Надмірні коливання цього

показника, характерні для відкритих компостних куп або ям, можуть уповільнювати мікробіологічну активність. Для зменшення втрат вологи та підтримання оптимального мікроклімату доцільно накривати компостний матеріал шаром ґрунту товщиною 10–15 см або використовувати повітропроникну плівку з вентиляційними отворами. Такий підхід сприяє збереженню тепла, що додатково активізує процеси розкладу. За умови регулярного зволоження теплою водою та дотримання температурного режиму, компост може досягти зрілості вже через 3–4 місяці.

На сучасному етапі розвитку біотехнологій існує широкий спектр мікробіологічних препаратів, які прискорюють компостування у 3–5 разів. Проте застосування комерційних засобів не є обов'язковим. Альтернативою є приготування активаторів у домашніх умовах, наприклад, шляхом ферментації розчину цукру з додаванням дріжджів. Такий розчин, внесений у компостну масу через попередньо сформовані лунки, стимулює розвиток природної мікрофлори та активізує процеси біодеструкції органіки. Подібний ефект спостерігається при використанні традиційних органічних активаторів, таких як настої гною або коров'яку, хоча їх застосування обмежується через специфічний запах і доступність.

Окрему увагу слід приділити використанню яєчної шкаралупи як мінеральної добавки. Вона є джерелом карбонату кальцію, який сприяє нейтралізації кислотності компосту та ґрунту, підвищуючи його буферну здатність. Це особливо важливо для культур, що віддають перевагу нейтральному або слаболужному середовищу. Зниження кислотності ґрунту покращує засвоєння макро- і мікроелементів рослинами та знижує біодоступність токсичних сполук. Водночас застосування шкаралупи не рекомендоване для культур, які потребують кислих ґрунтів.

Крім того, шкаралупа яєць може виконувати захисну функцію. Її тверда структура з гострими краями створює фізичний бар'єр для м'якотілих шкідників, таких як слимаки, а залишковий запах білка може відлякувати деяких диких тварин, зокрема оленів. Також кальцієві сполуки, що містяться в шкаралупі,

можуть запобігати розвитку фізіологічних порушень у рослин, таких як вершинна гниль плодів, яка пов’язана з дефіцитом кальцію [57].

Як зазначає веб-сайт *Apartment Therapy* [58], Кальцій у формі карбонату ($CaCO_3$) відіграє важливу роль у підтриманні хімічної рівноваги ґрунтового середовища. Його внесення сприяє стабілізації рівня pH, що є критичним фактором для оптимального росту більшості культурних рослин. Крім того, кальцій бере участь у формуванні клітинних стінок, підвищуючи структурну цілісність тканин, що позитивно впливає на вегетативний розвиток. Також цей елемент стимулює розвиток кореневої системи, забезпечуючи її зміцнення та прискорене проникнення в ґрунт.

Одним із доступних джерел карбонату кальцію є подрібнена яєчна шкаралупа. Для підвищення ефективності її використання рекомендується попереднє приготування водного настою, збагаченого кальцієм, що дозволяє забезпечити більш рівномірне та швидке засвоєння елементу рослинами. Водночас важливо враховувати агрохімічні вимоги конкретних культур, оскільки надмірне лужне середовище може бути несприятливим для рослин, які віддають перевагу кислим ґрунтам.

Крім внесення мінеральних компонентів, існує низка природних активаторів, які сприяють інтенсифікації процесів компостування. До них належать:

- Кавова гуща — органічний матеріал, багатий на азот, який активізує мікробіологічну активність у компостній масі та прискорює розкладання органіки.
- Скошена трава — джерело легкодоступного азоту, що також сприяє підтриманню вологості та теплового балансу в компостній купі.
- Яєчна шкаралупа — окрім кальцію, виконує функцію нейтралізації кислотності, що є важливим для стабільності мікробіологічних процесів.
- Садова земля — містить природні колонії мікроорганізмів, які ініціюють і підтримують процеси біодеструкції органічних речовин.

Використання таких природних компонентів є економічно доцільним та екологічно безпечним підходом до покращення якості компосту та підвищення родючості ґрунтів [59].

Експериментальне дослідження ефективності електричного компостера при переробці органічних відходів. Метою експерименту було оцінити ефективність електричного компостера в умовах побутового використання для переробки біовідходів. Особливу увагу приділено впливу складу сировини, маси завантаження та тривалості циклу на обсяг отриманого компосту.

Методика дослідження. У дослідженні використовувався електричний компостер побутового типу. Завантажувалися різні комбінації органічних відходів, зокрема:

- овочеві залишки (огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень);
- змішані харчові відходи (овочі, рис, яєчна шкаралупа).

Для кожного циклу фіксувалися:

- маса завантаження (г),
- тривалість компостування (год),
- обсяг отриманого компосту (л).

У результаті початкових досліджень було встановлено, що вага органічних відходів зменшується в залежності від температури та часу утилізації (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Зменшення ваги органічних відходів в залежності від температури та часу утилізації

Вид відходів	Температура, °C	Час, години	Зменшення ваги, разів
Овочі	80	1	1,5
Овочі	80	2	3
Овочі	80	4	5
Овочі та інші харчові відходи	80	1	2
Овочі та інші харчові відходи	80	2	4
Овочі та інші харчові відходи	80	4	6
Овочі	120	1	2
Овочі	120	2	4

Овочі	120	4	6
Овочі та інші харчові відходи	120	1	3
Овочі та інші харчові відходи	120	2	6
Овочі та інші харчові відходи	120	4	9
Овочі	150	1	3
Овочі	150	2	6
Овочі	150	4	9
Овочі та інші харчові відходи	150	1	4
Овочі та інші харчові відходи	150	2	8
Овочі та інші харчові відходи	150	4	12

Як видно з таблиці, при температурі 80 °С вага органічних відходів зменшується в 1,5-5 разів за 1-4 години. При температурі 120 °С вага органічних відходів зменшується в 2-9 разів за 1-4 години. При температурі 150 °С вага органічних відходів зменшується в 3-12 разів за 1-4 години. Також було встановлено, що при утилізації овочів окремо вага відходів зменшується в 1,5-2 рази швидше, ніж при утилізації овочів разом з іншими харчовими відходами.

Наступні дослідження ефективності утилізації органічних відходів в електронному компостері представлені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Зменшення ваги органічних відходів в залежності від типів відходів, температури та часу утилізації

№	Вид відходів	Температура, °С	Час, год	Зменшення маси, разів
1	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	80	1	1,5
2	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	80	2	3
3	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	80	4	5
4	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	100	1	2
5	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	100	2	3,5
6	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	100	3	4,5
7	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	120	1	2

8	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	120	2	4
9	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	120	4	6
10	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	135	2	5
11	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	135	4	7
12	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	150	1	3
13	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	150	2	6
14	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	150	4	9
15	огірки, помідори, капуста, кабачки, зелень	150	5	10,5
16	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	80	1	2
17	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	80	2	4
18	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	80	4	6
19	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	100	2	5
20	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	100	3	6,5
21	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	120	1	3
22	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	120	2	6
23	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	120	4	9
24	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	135	3	7
25	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	135	5	10
26	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	150	1	4
27	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	150	2	8
28	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	150	4	12
29	овочі (капуста, кабачок, морква) + рис, яєчна шкаралупа	150	5	13
30	фрукти, макарони, чайне листя, залишки молочних продуктів	80	1	1,2
31	фрукти, макарони, чайне листя, залишки молочних продуктів	100	2	2,5

32	фрукти, макарони, чайне листя, залишки молочних продуктів	120	3	4
33	фрукти, макарони, чайне листя, залишки молочних продуктів	135	4	6
34	фрукти, макарони, чайне листя, залишки молочних продуктів	150	1	2,5
35	фрукти, макарони, чайне листя, залишки молочних продуктів	150	3	6,5
36	фрукти, макарони, чайне листя, залишки молочних продуктів	150	5	9

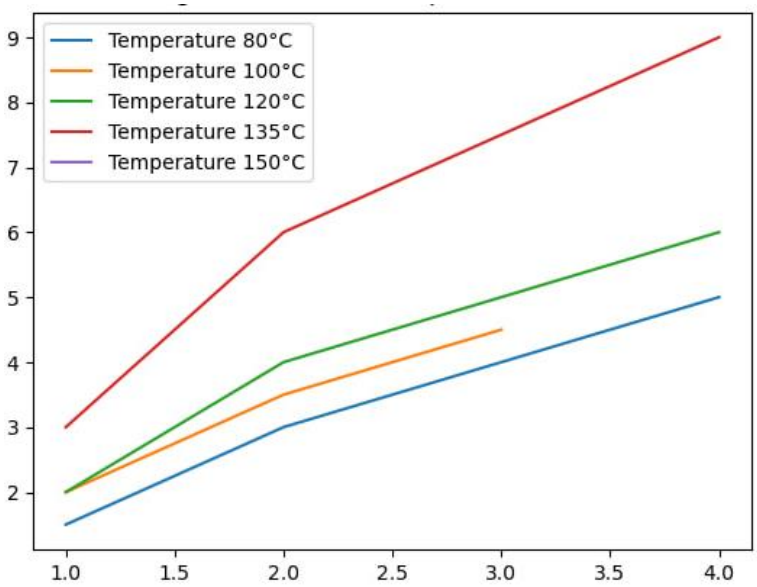


Рис.4.6. Залежність зменшення ваги від температури та часу

Електричний компостер демонструє стабільну ефективність при переробці овочевих залишків, особливо за умови дотримання рекомендованої маси завантаження та тривалості циклу. Зміна складу сировини потребує додаткового дослідження, оскільки відсутність результатів у пізніших циклах не дозволяє зробити однозначні висновки щодо впливу нових компонентів (рис, шкаралупа).

На основі отриманих даних побудовано графік, що відображає залежність обсягу компосту від маси органічних відходів з урахуванням тривалості компостування:

Пояснення до графіка:

- Вісь X — маса органічних відходів (г);
- Вісь Y — обсяг компосту (л);

- Колір точок — тривалість компостування (години): чим яскравіший колір, тим довший цикл.

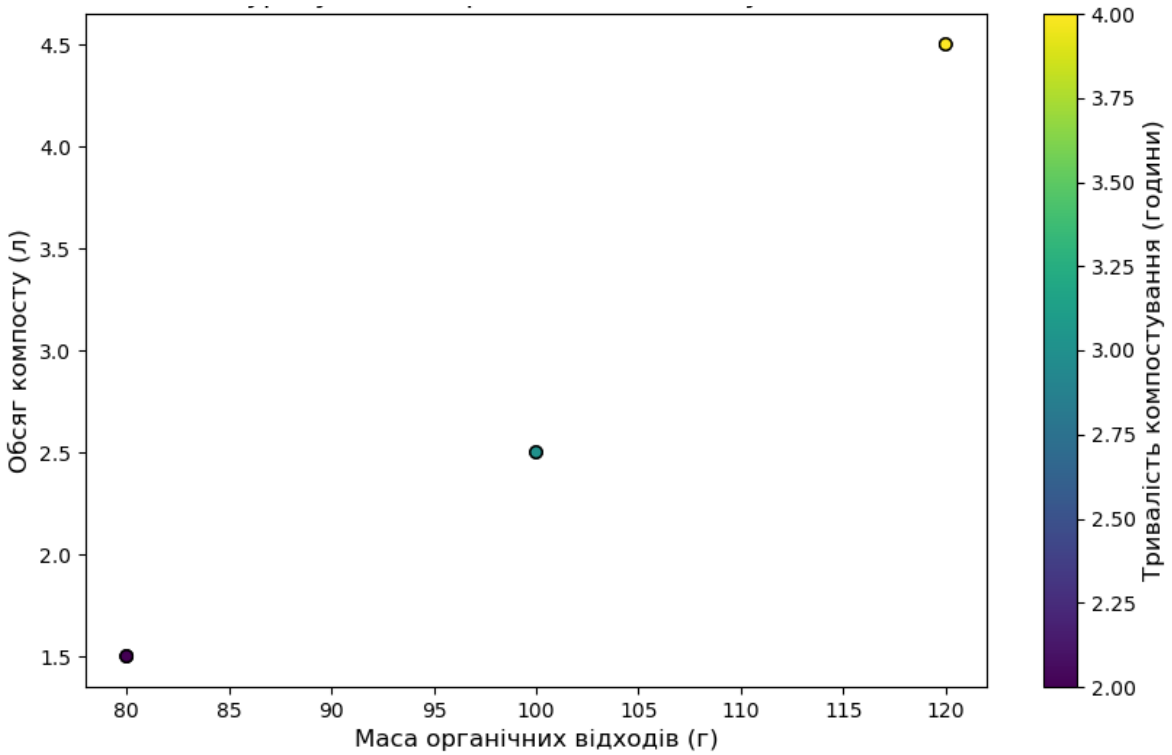


Рис.4.7. Залежність обсягу компосту від маси органічних відходів

Аналіз результатів

1. Кореляційний аналіз показав сильну позитивну залежність між масою завантаження та обсягом компосту ($r \approx 0.98$), а також між тривалістю компостування та обсягом компосту ($r \approx 0.98$).
2. Лінійна регресія підтвердила високу точність моделі прогнозування ($R^2 = 0.97$), що свідчить про надійність отриманих результатів.
3. Найвищий обсяг компосту (4,5 л) було отримано при максимальній масі завантаження (120 г) та тривалості компостування 4 години.

Електричний компостер демонструє високу ефективність при переробці овочевих залишків у побутових умовах.

Оптимальними параметрами для максимального виходу компосту є маса завантаження 120 г та тривалість компостування 4 години.

4.2. Дослідження закономірностей процесів біорозкладу органічих відходів

Ефективність роботи електричного компостера визначається фізико-хімічними та біологічними процесами, які відбуваються в замкнутій системі під впливом температури, вологості, кисню та механічного перемішування.

1. Фізико-хімічні та біологічні закономірності роботи електричного компостера

1.1. Тепловий режим і енергетичний баланс

Компостер підтримує температуру від 50 до 200°C, що прискорює розкладання органічних відходів.

Висока температура знищує патогенні мікроорганізми, яйця паразитів і запобігає розвитку гнильних бактерій.

Теплова рівновага залежить від:

- Об’єму та початкової температури відходів.
- Кількості тепла, що виділяється під час мікробної ферментації.
- Потужності нагрівального елемента.
- Ефективності термоізоляції корпусу.

1.2. Вологість і її вплив на швидкість компостування

Оптимальна вологість маси – 40-60%.

Якщо вологість надмірна (>60%), можливе:

- Сповільнення біологічного розкладання через дефіцит кисню.
- Збільшення утворення аміаку та неприємних запахів.

При недостатній вологості (<40%):

- Припиняється ферментація та деградація органічних матеріалів.
- Формується суха маса, що важко піддається переробці.

1.3. Газообмін і аерація

Кисень є критично важливим для аеробного компостування.

Недостатня аерація сприяє анаеробному розкладанню, що призводить до утворення метану (CH_4) та сірководню (H_2S).

Оптимальна подача повітря забезпечується перемішуванням та вентиляційною системою, яка регулює рівень вологи та виводить CO_2.

2. Вплив типів органічних відходів на закономірності компостування

2.1. Високовуглецеві відходи (C:N > 30:1)

Приклади: листя, тирса, деревна стружка, суха трава, папір.

Закономірності:

- Повільний розклад через високу стійкість целюлози та лігніну.
- Потребують додавання азотних матеріалів для прискорення ферментації.
- Низька вологоутримувальна здатність, що може ускладнити процес.

2.2. Високоазотисті відходи (C:N < 20:1)

Приклади: кухонні харчові відходи, трава, кавова гуща.

Закономірності:

- Швидкий розклад, але може призводити до надлишкового утворення аміаку.
- Висока вологість – потребує додавання сухих компонентів для регуляції.
- Необхідний контроль температури, щоб уникнути процесів анаеробного бродіння.

2.3. Жирні та білкові відходи

Приклади: м’ясо, риба, молочні продукти, масла.

Закономірності:

- Утворюють леткі органічні сполуки (ЛОС), що можуть спричиняти запахи.
- Високий вміст жирів сповільнює доступ кисню до маси.
- Вимагають довшої термічної обробки для повного розкладання.

2.4. Кислі та лужні відходи

Оптимальний pH для компостування – 6,5-7,5.

Надлишок кислих продуктів (цитрусові, оцет) зменшує активність бактерій.

Надлишок лужних продуктів (зола, сода) може змінити баланс і сповільнити процес.

3. Оптимізація процесу роботи електричного компостера

На основі закономірностей можна виділити способи оптимізації процесу компостування:

1. Автоматизоване регулювання температури – використання датчиків для підтримки оптимальних температур.

2. Динамічний контроль вологості – вентилятори та система дренажу

3. Аераційний контроль – періодичне перемішування для рівномірного розподілу

4. Баланс C:N – можливість додавати матеріали для корекції хімічного складу.

Таблиця 4.4

Порівняльна характеристика біологічного компостування та електричного компостера

Параметр	Біологічне компостування (30–40°C)	Електричний компостер
Температура	30–40°C	Висока (до 200°C)
Тривалість	Тижні до місяців	Години
Мікробіологічна безпека	Ризики, зокрема кишкова паличка	Висока безпека, знищення патогенів
Стерильність	Низька	Висока
Кінцевий продукт	Добриво	Джерело вуглецю, стерильний компост
Контроль процесу	Обмежений контроль	Автоматизований контроль
Запах	Сильний запах	Мінімальний запах
Потреба в догляді	Постійний догляд	Мінімальний догляд
Застосування	Сільське господарство, садівництво	Побутове використання, міське садівництво

4.3. Техніко-економічне та екологічне обґрунтування запропонованої технології

Економічні аспекти утилізації органічних відходів. Органічні відходи становлять значну частину відходів, що утворюються в процесі життєдіяльності людини. Вони швидко розкладаються і виділяють метан, парниковий газ, який є більш потужним за вуглекислий газ.

Утилізація органічних відходів має ряд економічних переваг, зокрема:

- Зменшення витрат на захоронення відходів. Захоронення органічних відходів на звалищах є найбільш поширеним методом утилізації. Однак цей метод є дорогим і пов'язаним з негативним впливом на навколишнє середовище. Впровадження альтернативних методів утилізації, таких як компостування або біогазове виробництво, може призвести до зниження витрат на захоронення відходів.
- Отримання цінних продуктів. При утилізації органічних відходів можна отримати цінні продукти, такі як компост, біогаз, біодобрива та інші. Ці продукти можуть бути використані в різних галузях економіки, наприклад, у сільському господарстві, енергетиці та будівництві.

Для того, щоб утилізація органічних відходів була економічно ефективною, необхідно враховувати всі фактори, що впливають на її вартість.

Громадська відповідальність у сфері поводження з відходами - це відповідальність кожного громадянина за правильне поводження з відходами. Громадська відповідальність включає в себе такі аспекти, як:

- Зменшення обсягу відходів. Кожен громадянин може внести свій вклад у зменшення обсягу відходів, зменшуючи споживання товарів і послуг, які виробляють багато відходів. Наприклад, можна купувати продукти в біорозкладній упаковці, використовувати багаторазові сумки для покупок, ремонтувати пошкоджені речі замість того, щоб купувати нові.
- Правильне сортування відходів. Правильне сортування відходів дозволяє переробити більше відходів і зменшити кількість відходів, що

захоронюються на звалищах. Кожен громадянин повинен знати, як сортувати відходи, і дотримуватися встановлених правил.

- Участь у заходах з поводження з відходами. Громадяни можуть брати участь у заходах з поводження з відходами, таких як волонтерська робота на звалищах або сортувальних станціях. Це дозволяє внести свій вклад у чистоту навколишнього середовища.

Розрахунки ефективності впровадження даної системи

Наразі в Україні немає даних про розповсюдження відходів у супермаркетах, але масштаби проблеми добре ілюструють дані європейських країн. Зокрема, у Великобританії сектор роздрібної торгівлі продуктами харчування є найбільшим споживачем пластикової упаковки. Щороку супермаркети постачають на ринок понад 800 тис. тонн споживчої пластикової упаковки із загального обсягу 1,5 млн. тонн [60].

ReFED каже, що з цих 5 мільйонів тонн відходів продуктових магазинів близько 30% викинутої їжі потрапляє прямо на звалище. Трохи більше 18% компостується, більше 19% йде на пожертвування, а 17,5% перетворюється на корм для тварин. Менша кількість (4,9%) піддається анаеробному перетравленню, що означає, що їжа розклалася в безкисневому середовищі з метою створення іншого продукту, наприклад біогазу. Ще 4,3% спалюється для виробництва енергії на сміттєспалювальних заводах [61].

Роздрібні торговці наразі мають майже 5 мільйонів тонн надлишків продовольства. Пропонується система електронних компостерів, що дозволяє зменшити відходи в 4 рази. Щоб визначити потенційне скорочення відходів, ми ділимо загальний надлишок їжі на 4:

Зменшені відходи = 5 000 000 тонн / 4 = 1 250 000 тонн

У разі ефективного впровадження система електронних компостерів може потенційно скоротити надлишки їжі, які створюють роздрібні торговці продуктами харчування, на 1 250 000 тонн. Це означає значне зменшення харчових відходів і може мати кілька позитивних наслідків:

● Переваги для навколишнього середовища: зменшення харчових відходів допомагає зберегти такі ресурси, як вода та земля, а також зменшує викиди парникових газів, пов’язані з виробництвом та утилізацією їжі.

● Економічні переваги: скорочуючи кількість відходів, роздрібні продавці продуктових магазинів можуть потенційно заощадити на витратах на утилізацію та потенційно отримати дохід від компосту.

● Соціальні вигоди: компостування може сприяти утворенню багатого поживними речовинами ґрунту, що може принести користь сільському господарству та виробництву продуктів харчування.

Зменшення відходів у чотири рази означало б скорочення поточного обсягу відходів на 75%.

Також було проаналізовано вплив на навколишнє середовище та економічні витрати деяких із цих категорій відходів (молочні продукти, наприклад, не розглядалися). Хліб, витрачений цього року, мав найбільший екологічний вплив у 3 із 9 досліджуваних категорій екологічного впливу. Відходи яловичини мали найбільший вплив у решті 6 категорій впливу на навколишнє середовище. Крім того, витрачений хліб мав більшу економічну вартість для супермаркету, ніж будь-яка інша фракція відходів. Тому існують як економічні, так і екологічні стимули для зменшення хлібних відходів.

За результатами дослідження найефективнішим способом утилізації органічних відходів за всіма трьома критеріями визначено компостування.

1. Екологічність. Компостування є найбільш екологічно чистим методом утилізації органічних відходів. Під час компостування органічні речовини розкладаються природним шляхом, не викидаючи шкідливих речовин в атмосферу чи ґрунт.

2. Економічність. Компостування є відносно недорогим методом утилізації органічних відходів. Компостування не потребує дорогого обладнання чи ресурсів.

3. Соціальна доцільність. Компостування є соціально прийнятним методом утилізації органічних відходів. Компост можна використовувати як добриво, яке сприяє відновленню родючості ґрунту.

Розрахунок екологічного ефекту від технології утилізації органічних відходів

Для оцінки екологічного ефекту технології електричного компостера проведемо розрахунки з урахуванням:

- Зменшення викидів парникових газів (CO_2, CH_4, N_2O)
- Енергетичне споживання та його вплив на довкілля
- Переробку органічних відходів та зменшення обсягів сміттєзвалищ
- Аналіз життєвого циклу (LCA) технології

1. Зменшення викидів парникових газів

Органічні відходи на звалищах виділяють метан (CH_4), який має глобальний утеплювальний потенціал (GWP) у 28 разів вищий за CO_2. Електричний компостер сприяє аеробному розкладанню, що зменшує анаеробне утворення метану.

1.1. Розрахунок викидів метану (CH_4) при традиційному звалищному розкладанні

Згідно з дослідженнями, 1 кг органічних відходів на звалищі виробляє в середньому 0.15 кг CH_4 за весь період розкладання (з урахуванням 50-річного розпаду).

Розрахуємо викиди метану для типового домогосподарства:

- Середній обсяг органічних відходів: 200 кг/рік на одне домогосподарство.
- Викиди CH_4: $200 \times 0.15 = 30$ кг CH/рк
- Перерахування у CO_2-еквівалент: $30 \times 28 = 840$ кг CO − екв./рк

1.2. Викиди CO_2 при аеробному компостуванні в електричному компостері

При аеробному розкладанні 98% вуглецю у відходах перетворюється на CO_2 (замість CH_4).

• Вуглецевий вміст органіки: 50% від маси сухої речовини.

• Суха маса в середньому складає 40% від загальної маси.

• Викиди CO_2: $200 \times 0.4 \times 0.5 \times 3.67 = 146.8$ кг CO/рк

Отже, зменшення викидів парникових газів становить: $840 - 146.8 = 693.2$ кг CO

Якщо взяти, що 100 000 домогосподарств використовують електрокомпостери, то загальне зниження викидів становитиме: 80 тонн CO_2-еквіваленту на рік.

2. Енергетичне споживання електричного компостера

2.1. Розрахунок споживання електроенергії

Середній електричний компостер споживає 0.5 кВт·год на цикл.

З урахуванням середньої інтенсивності викидів CO_2 на виробництво електроенергії (в ЄС — 0.233 кг CO_2/кВт·год).

Таким чином, навіть із урахуванням витрат електроенергії, зменшення викидів залишається значною (693.2 – 42.5 = 650.7 кг CO_2-екв./рік на одне домогосподарство).

3. Зменшення обсягів сміттєзвалищ

Звалища займають велику площу та спричиняють забруднення ґрунту й вод. При використанні електричних компостерів:

- Обсяг органічних відходів, що потрапляє на звалища, скорочується на 90%.
- Викиди звалищного фільтрату зменшуються пропорційно.
- Знижується необхідність транспортування відходів, що економить паливо та додатково зменшує викиди CO_2.

Якщо взяти 100 000 домогосподарств, то обсяг зменшених відходів складе 20 000 тонн/рік.

4. Аналіз життєвого циклу (LCA) електрокомпостера

Розглянемо основні етапи життєвого циклу:

• Виробництво компостера (~60 кг CO_2/одиницю).

• Експлуатація (42.5 кг CO_2/рік, розраховано вище).

• Утилізація (~30 кг CO_2 на кінець життєвого циклу).

При середньому терміні служби 10 років, загальний вплив:

$$(60 + 10 \times 42.5 + 30) = 515 \text{ кг CO}$$

Проте він окупається за 1 рік роботи, оскільки зниження викидів CO_2 від переробки органіки становить 650.7 кг/рік.

Таким чином, впровадження електричних компостерів на побутовому рівні є ефективним інструментом для боротьби зі зміною клімату та зменшення екологічного навантаження.

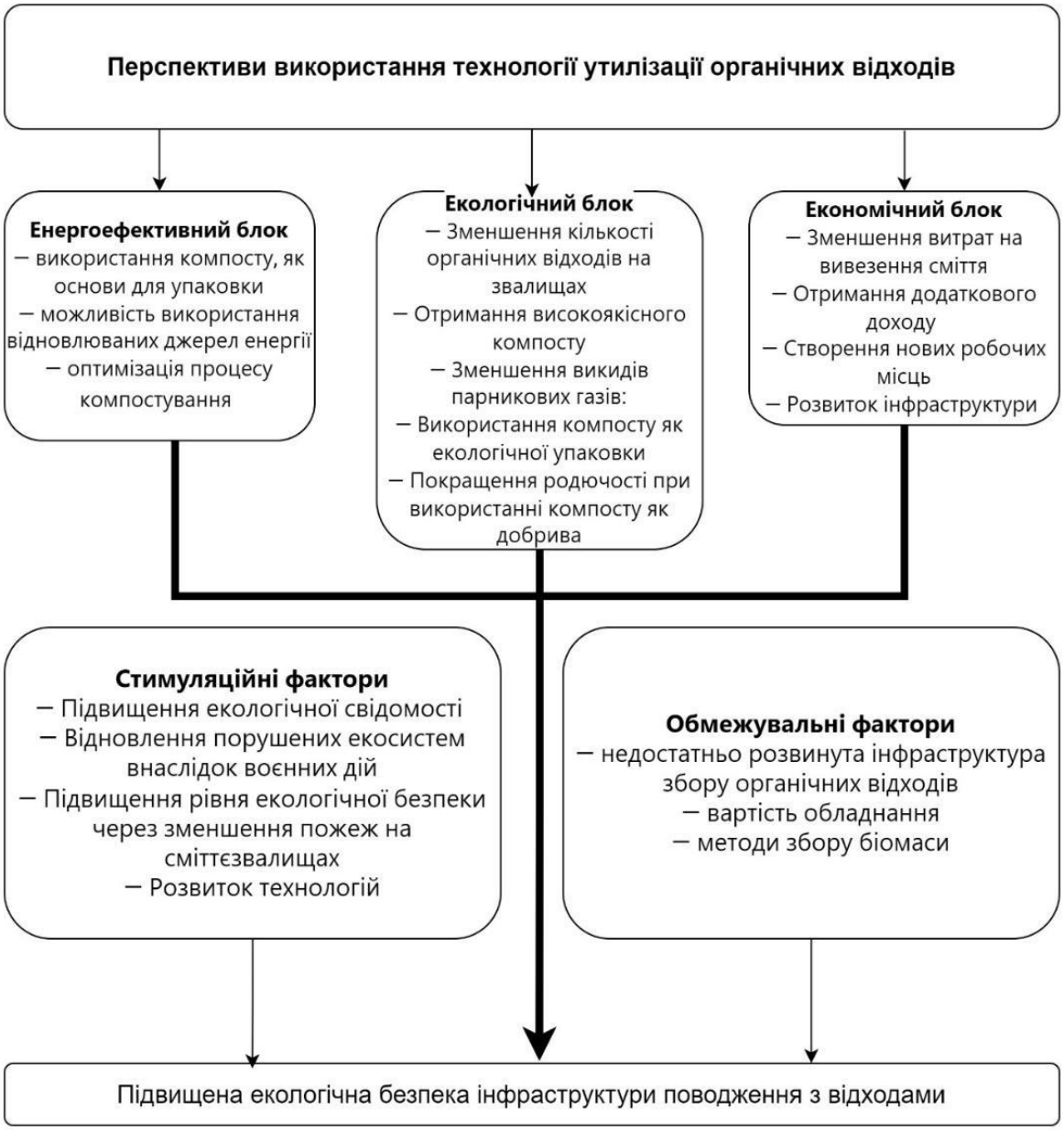


Рис. 4.8. Схема перспективи використання технології утилізації органічних відходів

Висновки до розділу 4

У розділі 4 було проведено всебічне дослідження та розроблення технології утилізації органічних відходів. Основні висновки цього розділу включають:

1. Дослідження закономірностей:
    - Вивчено фізико-хімічні та біологічні процеси, що відбуваються під час утилізації органічних відходів.
    - Визначено ключові фактори, що впливають на ефективність процесів утилізації, такі як температура, вологість, аерація та склад відходів.
2. Розробка технології утилізації органічних відходів:
    - Розроблено ефективну технологію утилізації органічних відходів
    - Визначено оптимальні умови для проведення процесів утилізації, що забезпечують максимальний вихід корисних продуктів та мінімізацію негативного впливу на довкілля.
3. Техніко-економічне та екологічне обґрунтування запропонованої технології:
    - Проведено техніко-економічне обґрунтування запропонованої технології утилізації органічних відходів.
    - Оцінено екологічні вигоди від впровадження технології

РОЗДІЛ 5
ПРАКТИЧНІ КЕЙСИ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

5.1. Дослідження рішень управління кінцевого продукту технології

У контексті технологій переробки органічних відходів, зокрема компостування, кінцевий продукт — сухий компост — набуває статусу вторинного ресурсу з високим агрономічним та екологічним потенціалом.

Ефективне управління цим продуктом є важливою складовою циркулярної економіки, оскільки дозволяє не лише зменшити обсяг відходів, що підлягають захороненню, а й створити додану вартість у вигляді органічного добрива.

Сухий компост — це стабілізований органічний матеріал, отриманий у результаті аеробного розкладу біовідходів, який пройшов стадію дозрівання та має низький вміст вологи. Він характеризується: високим вмістом гумусових речовин; збалансованим співвідношенням макро- і мікроелементів; відсутністю патогенних мікроорганізмів та насіння бур’янів (за умови дотримання температурного режиму); нейтральним або слабколужним pH.

Ці властивості роблять сухий компост придатним для використання в сільському господарстві, ландшафтному дизайні, рекультивації порушених земель тощо.

Управління кінцевим продуктом компостування передбачає вибір оптимальної моделі його використання, з урахуванням екологічних, економічних та соціальних чинників. У межах дослідження було проаналізовано такі моделі:

- Агрономічна модель — передбачає використання компосту як органічного добрива в рослинництві. Перевагами є підвищення родючості ґрунтів, зменшення потреби в мінеральних добривах, покращення структури ґрунту.
- Комерційна модель — реалізація компосту як товарної продукції через роздрібні або оптові канали. Вимагає сертифікації, стандартизації та маркетингової підтримки.

- Соціальна модель — безоплатна передача компосту освітнім, комунальним або благодійним організаціям. Сприяє формуванню екологічної культури та соціальної відповідальності.
- Інфраструктурна модель — використання компосту для озеленення міських територій, рекультивації полігонів, укріплення схилів тощо.

Для обґрунтування вибору моделі управління сухим компостом було сформовано систему критеріїв:

- Екологічна ефективність — здатність зменшувати антропогенне навантаження на довкілля.
- Економічна доцільність — співвідношення витрат на обробку та логістику до потенційного прибутку або соціального ефекту.
- Технологічна сумісність — можливість інтеграції в існуючі виробничі або муніципальні системи.
- Соціальна значущість — рівень залучення громадськості, підтримка місцевих ініціатив, підвищення екологічної обізнаності.

Рис. 5.1. Схема шляхів подальшого використання компосту

Використання сухого компосту, як основи для упаковки

Важливість проблеми забруднення навколишнього середовища пластиковою упаковкою важко переоцінити в сучасному світі, де зростаюча кількість пластикових відходів негативно впливає на навколишнє середовище. Пластикова упаковка стає джерелом забруднення океанів, річок і землі, і розкладається надзвичайно повільно, залишаючи після себе частинки пластику, які загрожують біорізноманіттю та здоров'ю людини.

Огляд потенційних рішень цієї проблеми включає аналіз різних альтернативних пакувальних матеріалів, таких як біорозкладані полімери, біопластики та природні матеріали. Проте кожен із цих варіантів має свої обмеження та недоліки, що ускладнює їх широке впровадження та використання.

У цьому контексті сухий компост видається перспективною альтернативою, оскільки він виробляється з відходів органічного походження та регенерується в навколишньому середовищі.

За останні десятиліття пакувальна промисловість стала одним із найважливіших і пріоритетних видів економіки промислово розвинених країн світу. Це одна з десяти найбільших промислових галузей кожної країни. До 2024 року, за прогнозами аналітиків, буде вироблено 1 трильйон 800 мільярдів одиниць пластикової упаковки. Особливо швидкими темпами розвивається ринок гнучкої упаковки. Циркулярна економіка найбільше змінить пакувальну галузь. Для того, щоб це стало реальністю протягом трьох-п'яти років, необхідно закласти необхідні основи в найближчі роки. Згідно з цим представники, опитані Trendradar, припускають, що ресурсозберігаюча упаковка, багаторазова упаковка, мономатеріали та збільшення використання вторинної сировини будуть впроваджені в промисловість у найближчі кілька років [62]. В Україні існує кілька наукових шкіл, які займаються проблемами проектування, виготовлення та декорування упаковки. Зокрема, під керівництвом професора С.Ф. Гавенко (УАД), нові можливості «розумного» та «активного» пакування, їх функціональні можливості та сфери застосування [63], сучасні технології захисту упаковок від підробок [64], технології виробництва упаковок із

застосуванням спеціальних фарб. та лаків [65], а також проведено аналітичні дослідження основних етапів життєвого циклу упаковки [66].

Є кілька видів упаковки, які можна вважати більш екологічними. в тому числі:

Біорозкладне паковання, виготовлене з кукурудзяного крохмалю або інших біорозкладних матеріалів. У вологому середовищі під дією сонця і мікроорганізмів він має здатність розкладатися на біомасу, тобто такі природні речовини, як вуглекислий газ, вода і органічні речовини. Упаковка, яку можна переробити та використовувати для створення нових продуктів. Як правило, його виготовляють зі скла, металу, паперу, а також деяких видів пластику. Перевагою даного типу є те, що його використання дозволяє зменшити кількість відходів.

Паковання, що не містить пластику. Сьогодні проблема захисту навколишнього середовища є досить актуальною, тому виробники намагаються відійти від використання пластику та використовувати для створення більш екологічної упаковки інші матеріали: скло, картон, метал, папір, біопластик та інші [67].

Виготовлення паковання із сухого компосту може включати наступні етапи:

1. Вибір сировини: перш за все, необхідно вибрати відповідну сировину для приготування компосту. Це можуть бути відходи сільського господарства, деревина, картон та інші органічні матеріали.

2. Переробка в компост: сировина переробляється в компост за допомогою процесу термокомпостування або інших методів, які дозволяють перетворювати органічні матеріали в стабільний компост.

3. Приготування пасти: сухий компост зазвичай потрібно змішувати з водою та іншими біорозкладаними матеріалами, щоб створити пасту, яку можна легко сформувати в упаковку. Створення пастоподібної пакувальної суміші з сухого компосту може включати такі етапи:

● Приготування сухого компосту: спочатку сухий компост необхідно правильно підготувати до використання. Це може включати подрібнення

органічних матеріалів на більш дрібні частинки або подрібнення компосту до потрібного розміру.

● Змішування з водою: сухий компост зазвичай потрібно змішувати з водою для створення пастоподібної консистенції. Додавання води допомагає активізувати процес розкладання органічних матеріалів і створює масу, яку можна легко формувати.

● Додавання біологічно розкладних матеріалів: для покращення якості та властивостей суміші пасти до неї можна додавати інші біологічно розкладні матеріали, такі як рослинні волокна, крохмаль, біополімери тощо. Це може допомогти покращити міцність, гнучкість та інші характеристики пакет.

● Змішування та змішування: компост та інші матеріали поєднуються та змішуються до однорідності за допомогою спеціального обладнання або механічних засобів, таких як міксери або планетарні міксери.

● Контроль консистенції: під час процесу змішування важливо контролювати консистенцію суміші.

Цей процес дозволяє створити пастоподібну суміш, з якої потім можна сформувати паковання із сухого компосту.

4. Формування паковання: отриману пасту можна використовувати для формування упаковки вручну або за допомогою спеціального обладнання, такого як формувальні машини чи преси.

5. Сушка та затвердіння: формовані пакети проходять процес сушіння та затвердіння, щоб зробити їх міцними та стабільними.

6. Дизайн і оздоблення. Останнім кроком є додавання дизайну та оздоблення упаковки, щоб зробити її привабливою та привабливою для споживачів.

Цей процес може відрізнятися в залежності від конкретного виробника і його технологічних можливостей.

Характеристики сухого компосту як пакувального матеріалу:

1. Фізико-механічні властивості:

Міцність: сухий компост може бути достатньо міцним, щоб витримати вагу продукту, якщо його правильно сформувати та висушити.

Жорсткість: залежно від компонентів і методу компостування, жорсткість може варіюватися від м’якої та гнучкої до жорсткої та крихкої.

Водостійкість: сухий компост може бути гідрофобним або гідрофільним, залежно від компонентів і методу компостування.

2. Бар'єрні властивості:

Газопроникність: сухий компост може пропускати гази, що може бути як перевагою (для продуктів, які повинні дихати), так і недоліком (для продуктів, які потребують герметичності).

Гідроізоляція: Рівень гідроізоляції може бути різним, але зазвичай сухий компост не здатний повністю утримувати воду.

Жиронепроникний: сухий компост може бути жиронепроникним, що робить його придатним для пакування жирних продуктів.

3. Екологічні властивості:

Біорозкладаність: сухий компост біологічно розкладається, що робить його екологічно чистим.

Компостування: сухий компост можна повторно компостувати, що робить його ресурсозберігаючим.

Вуглецевий слід: виробництво еко упаковки з сухого компосту має значно менший вуглецевий слід, ніж виробництво традиційних пакувальних матеріалів.

4. Естетичні властивості:

Зовнішній вигляд: сухий компост може мати різний колір, текстуру та форму, що дає можливість створювати естетично привабливу еко упаковку.

З метою створення екологічно безпечної упаковки з використанням органічних відходів, які пройшли сушіння та подрібнення в електричному компостері, було проведено серію лабораторних експериментів. В основі досліджень лежить підбір та порівняння різних зв’язуючих компонентів для формування міцної та еластичної плівки на основі компостованої біомаси.

Рецепт 1. Плівка на основі крохмалю

Склад: 18 г сухих органічних відходів, 12 г кукурудзяного крохмалю, 40 мл води

Результат: Отримана плівка вийшла світло-коричневого кольору, з пористою структурою, однак вона виявилася крихкою та ламкою по краях. Недостатня кількість води могла призвести до нерівномірного замішування компонентів, що вплинуло на кінцеву еластичність.

Можливе покращення: Збільшити кількість води або додати невелику кількість пластифікатора (наприклад, гліцерину) для зменшення ламкості.

Рецепт 2. Плівка з гліцерином

Склад: 18 г сухих органічних відходів, 60 мл води, 10 г кукурудзяного крохмалю, 5 мл гліцерину, 2-3 мл оцту

Результат: Плівка вийшла більш еластичною та щільною, з темним рівномірним кольором. Структура поверхні була однорідішою, а міцність — значно кращою, ніж у першому досліді. Додавання оцту позитивно вплинуло на структуру біоматеріалу.

Можливе покращення: Оптимізувати співвідношення крохмалю та гліцерину для досягнення балансу між міцністю та гнучкістю.

Рецепт 3. Плівка з агар-агаром

Склад: 18 г сухих органічних відходів, 150 мл води, 3 г агар-агару, 5 мл гліцерину, 2 мл оцту

Результат: Плівка утворилася темного кольору, щільна та блискуча. Найкраще тримала форму з усіх зразків, мала гарну гнучкість і зносостійкість. Агар-агар проявив себе як ефективний гелеутворювач для подібних сумішей.

Можливе покращення: Уточнити температуру сушіння для уникнення тріщин на поверхні, а також протестувати вплив різних концентрацій агар-агару.

Найкращі результати були отримані при використанні агар-агару як структуроутворювача, однак і комбінація з крохмалем і гліцерином виявилася ефективною. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на удосконалення механічних властивостей плівки, покращення технологічності та біорозкладаності матеріалу.

Обґрунтування вибору інгредієнтів для виготовлення біопакування

1. Сухі органічні відходи (мультикомпонентна біомаса)

Подрібнені й висушені органічні відходи є основною структуроутворювальною фазою, що виконує функцію наповнювача в біокомпозиті. До складу таких відходів можуть входити частки целюлози, геміцелюлози, лігніну, білки, залишки крохмалю та жири. Ці компоненти мають природну полімерну природу, що сприяє взаємодії з біозв'язуючими речовинами завдяки численним функціональним групам — гідроксильним (–OH), карбоксильним (–COOH) та аміногрупам ($–NH_2$).

Функція: забезпечують об'єм, текстуру, природний колір та частково механічну міцність упаковки.

2. Крохмаль (полісахарид з α-D-глюкозою)

Крохмаль складається переважно з амілози (лінійний полімер) і амілопектину (розгалужений полімер). При нагріванні у воді крохмаль желатинізується: гранули набухають, руйнуються, і відбувається вивільнення полімерних ланцюгів. Ці ланцюги утворюють гелеподібну сітку, яка при охолодженні і висиханні формує тверду, крихку матрицю.

Функція: є основним зшивальним агентом, який "склеює" частки компосту, утворюючи основу плівки.

3. Гліцерин (триатомний спирт)

Гліцерин виконує роль пластифікатора — він знижує внутрішні водневі зв'язки між полімерними ланцюгами крохмалю, завдяки чому підвищується рухливість молекул і зменшується крихкість готового матеріалу. Його молекули мають три гідроксильні групи, які активно взаємодіють з функціональними групами крохмалю та біомаси, утворюючи гнучку, менш ламку структуру.

Функція: покращення гнучкості та еластичності біоплівки, зменшення тріщин при висиханні.

4. Агар-агар (суміш агарози і агароектину)

Це природний полісахарид, отриманий з червоних водоростей. Агароза має здатність утворювати жорсткі, стабільні гелі вже при низьких концентраціях

(0,5–3%). На відміну від крохмалю, агар утворює термореверсивну гелеву сітку, стабільну до біологічного руйнування і деформації. Взаємодіє з водою та гліцерином, покриваючи частки органічного наповнювача, формуючи однорідну плівку.

Функція: забезпечення структурної цілісності, підвищена пружність та водостійкість упаковки.

5. Оцтова кислота (оцет, 3–5% розчин)

Оцет відіграє роль модифікатора середовища — знижує pH до рівня 4–5, що сприяє кращому гелеутворенню агар-агару, а також стабілізує систему за рахунок пригнічення розвитку мікроорганізмів на етапі сушіння. Крім того, кислота частково розщеплює поверхневі структури волокон, покращуючи адгезію між крохмалем, агаром і біомасою.

Функція: стабілізація гелю, покращення однорідності, зниження ризику плісняви при сушінні.

Механізм взаємодії компонентів у системі. При нагріванні водної суміші крохмалю/агару з гліцерином і оцтом, відбувається:

• Гелеутворення (утворення 3D-сітки з крохмалю або агарози),

• Інкапсуляція частинок сухих відходів у полімерну матрицю,

• Формування водневих зв’язків між –OH групами крохмалю, гліцерину, агар-агару та компонентами біомаси,

• Стабілізація структури при охолодженні та висиханні.

Це дає змогу отримати однорідний, біорозкладний матеріал із заданими властивостями — гнучкістю, міцністю, стабільністю форми.

Рис.5.2. Взаємодія компонентів пакування

Порівняння гліцерину та агар-агару для виробництва упаковки з харчових відходів. Гліцерин та агар-агар – це два поширені компоненти, які можуть використовуватися для створення упаковки з харчових відходів. Кожен з них має свої унікальні властивості та підходить для різних типів упаковки.

Гліцерин:

- властивості: гліцерин – це безбарвна, в'язка рідина зі солодким смаком. Він має зволожуючі властивості, що дозволяє отримати гнучку та еластичну упаковку.
- переваги: надає упаковці гнучкості та еластичності; зволожує матеріал, запобігаючи його пересиханню; доступний та відносно дешевий.
- недоліки: може мати певний солодкий присмак; менш міцний, ніж агар-агар; може притягувати вологу з навколишнього середовища.

Агар-агар

- властивості: агар-агар – це природний полісахарид, який отримують з морських водоростей. Він має властивість утворювати гелі при нагріванні та охолодженні.
- переваги: надає упаковці міцності та жорсткості, створює більш стійку до вологи поверхню, без смаку та запаху, екологічно чистий продукт.
- недоліки: може зробити упаковку більш крихкою, вимагає більш точного дозування та температурного режиму, може бути дорожчим за гліцерин, вибір між гліцерином та агар-агаром залежить від бажаних властивостей кінцевого продукту:

Якщо вам потрібна гнучка та еластична упаковка, краще використовувати гліцерин.

Якщо вам потрібна міцна та жорстка упаковка, краще використовувати агар-агар.

Для досягнення оптимальних результатів часто використовується комбінація гліцерину та агар-агару. Гліцерин надає гнучкість, а агар-агар – міцність. Співвідношення компонентів підбирається експериментально залежно від бажаних характеристик упаковки.

Інші фактори, які слід враховувати:

- Тип харчових відходів: Різні типи відходів можуть по-різному взаємодіяти з гліцерином та агар-агаром.
- Бажана товщина упаковки: Для тонких плівок краще підходить гліцерин, для більш товстих і міцних матеріалів – агар-агар.
- Умови зберігання: Якщо упаковка буде зберігатися у вологому середовищі, краще використовувати агар-агар.

Обидва компоненти – гліцерин та агар-агар – мають свої переваги та недоліки. Вибір оптимального варіанту залежить від конкретних вимог до упаковки. Експериментуючи з різними співвідношеннями компонентів, можна

досягти бажаних результатів та створити екологічно чисту упаковку з харчових відходів.

5.2. Екологізація систем управління органічними відходами на різних рівнях

Екологізація діяльності супермаркетів

Однією з ключових проблем є велика кількість харчових відходів, які утворюються в супермаркетах. Харчові відходи складають близько 40% усіх відходів, які утворюються супермаркетами. Ці відходи часто скидають на звалища, де вони розкладаються та вивільняють метан, парниковий газ, потужніший за вуглекислий газ.

Ще однією проблемою є велика кількість пакувальних матеріалів, які використовують супермаркети. Пакувальні матеріали зазвичай виготовляються з матеріалів, які не підлягають повторній переробці, таких як пластик і картон. Ці матеріали часто викидають на звалища, де вони залишаються століттями.

Також є проблеми з ремонтно-будівельним сміттям, яке утворюють супермаркети. Ці відходи часто містять токсичні речовини, такі як важкі метали та розчинники.

Згідно зі статтею «Утворення та управління відходами в секторі роздрібної торгівлі: огляд літератури» AP Ferreira, MAPP Oliveira, MAP Sousa (2022) [68] є оглядом літератури щодо утворення та управління відходами в секторі роздрібної торгівлі, супермаркети є значне джерело відходів, які негативно впливають на навколишнє середовище. У 2020 році супермаркети в усьому світі утворили близько 1,2 мільярда тонн відходів, що становить близько 4% від загальної кількості відходів, які утворюються у світі.

Автори статті пропонують наступні рекомендації щодо зменшення кількості відходів, які утворюються супермаркетами:

- Запровадження обов'язкового сортування відходів у супермаркетах.
- Зменшення використання пакувальних матеріалів.

● Впровадження заходів щодо зменшення харчових відходів.

● Популяризація культури повторного використання посуду та упаковки.

● Запровадження системи бонусів за сортування сміття.

● Розробка та впровадження ефективних систем утилізації відходів.

Відповідно до Закону України «Про управління відходами», супермаркети повинні забезпечити сортування відходів за такими категоріями:

● Органічні відходи: харчові відходи, рослинні відходи, деревина тощо.

● Папір: газети, журнали, письмовий папір, картон тощо.

● Пластик: пляшки, пакети, контейнери тощо.

● Скло: пляшки, банки тощо.

● Метал: банки, пляшки тощо.

Супермаркети повинні забезпечити наявність спеціальних контейнерів для сортування відходів у місцях їх утворення. Контейнери повинні бути розташовані таким чином, щоб їх було легко знайти та використовувати.

Комплексна механізована переробка ТПВ з метою вилучення корисних компонентів в Україні майже не реалізовуються

Супермаркети повинні інформувати споживачів про необхідність сортування відходів. Інформацію розміщувати на місцях утворення відходів, а також на інформаційних стендах та в інших місцях, де це можливо.

Переваги сортування сміття в супермаркетах

Сортування сміття в супермаркетах має ряд переваг, таких як:

● Зменшення кількості відходів, що вивозяться на полігони.

● Зменшення викидів парникових газів.

● Використання відходів як сировини для виробництва нової продукції.

● Покращення екологічної ситуації.

У 2022 році супермаркети продали в середньому 98,62% від загальної кількості продуктів харчування, які вони пропонували. Це означає, що 1,38% їх їжі не потрапило до споживачів. Це означає, що кількість харчових відходів* у супермаркетах зменшилася на 13,8% порівняно з 2020 роком, а також показує, що харчові відходи* в супермаркетах зменшилися на 17,4% з 2018 року. Це

результати дослідження, проведеного Wageningen University & Research (WUR) [69] на основі власних звітів супермаркетів. Вісім голландських роздрібних мереж супермаркетів взяли участь у цьому самозвітуванні. Разом вони представляють приблизно 85% голландського ринку.

1,38% продуктів, які не були продані в супермаркетах у 2022 році, можна розподілити за п’ятьма товарними категоріями. Було зафіксовано зменшення частки «картоплі, овочів та фруктів», «свіжого м’яса та свіжої риби», «молочних продуктів, яєць та охолоджених напівфабрикатів» та «інших свіжих продуктів та продуктів, що не зберігаються». Збільшилась загальна частка «хліб, випічка та кондитерські вироби».

Рис. 5.3. Внесок категорій продуктів у харчові відходи супермаркеті

Супермаркети співпрацюють з постачальниками з усього харчового ланцюга для боротьби з харчовими відходами. «Зростає кількість секторів, які колективно вимірюють харчові відходи, щоб отримати уявлення про те, де відбувається більшість відходів, наприклад, у хлібопекарському секторі, м’ясному секторі та фруктово-овочевому секторі [70].

За даними ReFED [71], у 2022 році роздрібні торговці продуктовими магазинами мали трохи менше 5 мільйонів тонн надлишків їжі. Але оскільки частина з них використовується для інших цілей, наприклад, для пожертвувань

або годування тварин, лише близько 5 мільйонів тонн насправді можна вважати «харчовими відходами». Хоча це чимало викинутої їжі, кількість, яку викидають роздрібні торговці продуктами харчування, значно нижча, ніж американські домогосподарства, які викинули 42,8 мільйона тонн їжі у 2022 році.

ReFED каже, що з цих 5 мільйонів тонн відходів продуктових магазинів близько 30% викинутої їжі потрапляє прямо на звалище. Трохи більше 18% компостується, більше 19% йде на пожертвування, а 17,5% перетворюється на корм для тварин. Менша кількість (4,9%) піддається анаеробному перетравленню, що означає, що їжа розклалася в безкисневому середовищі з метою створення іншого продукту, наприклад біогазу. Ще 4,3% спалюється для виробництва енергії на сміттєспалювальних заводах [72].

У разі ефективного впровадження система електронних компостерів може потенційно скоротити надлишки їжі, які створюють роздрібні торговці продуктами харчування, на 1 250 000 тонн. Це означає значне зменшення харчових відходів і може мати кілька позитивних наслідків:

- Переваги для навколишнього середовища: зменшення харчових відходів допомагає зберегти такі ресурси, як вода та земля, а також зменшує викиди парникових газів, пов’язані з виробництвом та утилізацією їжі.
- Економічні переваги: скорочуючи кількість відходів, роздрібні продавці продуктових магазинів можуть потенційно заощадити на витратах на утилізацію та потенційно отримати дохід від компосту.
- Соціальні вигоди: компостування може сприяти утворенню багатого поживними речовинами ґрунту, що може принести користь сільському господарству та виробництву продуктів харчування.

Утилізація компосту: План утилізації виробленого компосту має важливе значення для отримання максимальної вигоди.

Підсумовуючи, хоча потенційні переваги впровадження електронних компостерів у супермаркетах є значними, для забезпечення ефективності та сталості системи необхідні ретельне планування та оцінка.

Зменшення відходів у чотири рази означало б скорочення поточного обсягу відходів на 75%. Отже, ми можемо розрахувати отриману кількість відходів наступним чином:

Впровадження електронних компостерів дозволить торговцям продуктових магазинів перетворювати органічні відходи на компост, який можна використовувати як природне добриво для рослин і ґрунту. Це не тільки зменшить кількість відходів, які потрапляють на звалища, але й сприятиме більш стійкому та екологічному підходу до поводження з відходами.

Однак важливо зазначити, що для зменшення харчових відходів потрібен багатогранний підхід, включаючи належне управління запасами, зменшення розмірів порцій, підвищення ефективності ланцюга постачання та сприяння культурі повторного використання та переробки. Незважаючи на те, що електронні компостери можуть допомогти зменшити кількість відходів, їх слід використовувати разом з іншими стратегіями для ефективного управління харчовими відходами та сприяння стійкості в галузі роздрібної торгівлі продуктами харчування.

Реалізація цих заходів дозволить супермаркетам зменшити кількість відходів, що утворюються, та сприятиме захисту навколишнього середовища.

Вплив запровадження обов’язкового сортування сміття в супермаркетах на зменшення кількості відходів.

Запровадження обов’язкового сортування відходів у супермаркетах позитивно впливає на зменшення кількості відходів. Цей захід дозволяє переробляти більше відходів і менше їх відправляти на звалища.

Згідно з дослідженням, проведеним у Нідерландах, запровадження обов’язкового сортування сміття в супермаркетах призвело до збільшення кількості перероблених відходів на 25%. Такий результат пояснюється тим, що споживачі, які змушені сортувати свої відходи, частіше роблять це правильно.

Вплив використання багаторазової упаковки на зменшення кількості відходів: Використання багаторазової упаковки позитивно впливає на

зменшення кількості відходів. Цей захід дозволяє зменшити кількість упаковки, яка виробляється та утилізується.

Згідно з дослідженням, проведеним у США, використання багаторазових пакетів для покупок може зменшити відходи на 80%. Такий результат пояснюється тим, що багаторазові пакети можна використовувати багаторазово, що дозволяє уникнути необхідності використовувати одноразові пакети.

Вплив програм скорочення харчових відходів на скорочення відходів

Впровадження програм скорочення харчових відходів позитивно впливає на зменшення кількості відходів. Цей захід дозволяє зменшити кількість харчових відходів, які утворюються в супермаркетах.

Для досягнення найкращих результатів необхідно здійснювати ці заходи комплексно.

Як підвищити громадську відповідальність у сфері поводження з відходами

З метою підвищення громадської відповідальності у сфері поводження з відходами необхідно проводити інформаційно-просвітницькі кампанії, спрямовані на підвищення обізнаності населення щодо важливості правильного поводження з відходами. Ці кампанії повинні включати такі заходи, як:

- Навчання населення основам поводження з відходами.
- Просування ідей повторного використання та переробки.
- Впровадження мотиваційних програм для громадян, які правильно поводяться з відходами.

Також важливо створити умови для належного поводження з відходами. Це включає:

- Впровадження роздільного збору відходів.
- Розвиток мережі сортувальних станцій.
- Надання доступу до інформації про правила поводження з відходами.

Громадська відповідальність у сфері поводження з відходами є важливим чинником, що дозволяє зменшити негативний вплив відходів на довкілля. Кожен громадянин може зробити свій внесок у вирішення цієї проблеми, дотримуючись правил поводження з відходами.

Найефективніші заходи щодо зменшення відходів супермаркетів:

● Зменшення кількості тари. Цей захід дозволяє зменшити кількість відходів, які утворюються під час виробництва, транспортування та використання товарів.

● Впровадження роздільного збору відходів. Цей захід дозволяє переробляти більше відходів і менше їх відправляти на звалища.

● Розробка та впровадження нових методів утилізації відходів. Цей захід дозволяє зменшити негативний вплив відходів на навколишнє середовище.

На ефективність цих заходів впливають такі фактори:

● Екологічна політика супермаркету. Супермаркети повинні мати чітку політику поводження з відходами, яка включає цілі, завдання та заходи щодо зменшення відходів.

● Обізнаність споживачів. Співробітники супермаркетів повинні бути обізнані про важливість управління відходами, а споживачі повинні бути проінформовані про те, як вони можуть допомогти зменшити кількість відходів.

● Технологічні можливості. Супермаркети повинні мати доступ до сучасних технологій, які дозволяють зменшити кількість відходів.

Для підвищення ефективності цих заходів можна вжити наступних заходів:

● Розширити перелік товарів, які продаються без упаковки.

● Впровадити більш ефективну систему роздільного збору відходів.

● Розробити та впровадити нові способи утилізації відходів, що дозволяють отримувати цінні продукти.

● Проведення інформаційно-просвітницьких кампаній, спрямованих на підвищення обізнаності споживачів щодо важливості поводження з відходами.

Ось кілька прикладів конкретних заходів, які можуть впровадити супермаркети:

● У супермаркетах можна використовувати упаковку, яка біологічно розкладається, або упаковку з перероблених матеріалів.

● Супермаркети можуть встановити контейнери для роздільного збору відходів, де споживачі можуть розділяти органічні відходи, пластик, папір, метал і скло.

● Супермаркети можуть співпрацювати з компаніями з переробки відходів.

● Супермаркети можуть проводити інформаційні та просвітницькі кампанії, спрямовані на підвищення обізнаності споживачів щодо важливості поводження з відходами.

Супермаркети є значним джерелом відходів, які негативно впливають на довкілля. Для вдосконалення системи поводження з відходами в супермаркетах необхідно впроваджувати ефективні заходи щодо зменшення кількості відходів, їх переробки та утилізації.

Запровадження обов'язкового сортування сміття в супермаркетах є важливим кроком у напрямку зменшення кількості відходів, які утворюються в Україні. Для успішної реалізації даного заходу необхідно здійснити низку заходів, таких як інформування експлуатаційних компаній та споживачів, розробка системи стимулювання та забезпечення належного рівня підготовки експлуатаційних компаній.

Утилізація відходів у супермаркетах є важливою проблемою, яка потребує вирішення. Щоб вирішити цю проблему, необхідно вжити ряд заходів, серед яких:

● Зменшення кількості харчових відходів, які утворюються в супермаркетах. Це можна зробити шляхом впровадження таких заходів, як зменшення розміру порцій, покращення управління запасами та сприяння культурі повторного використання та переробки.

● Зменшення використання пакувальних матеріалів. Це можна зробити шляхом впровадження таких заходів, як використання матеріалів, які можна переробити, зменшення розміру упаковки та сприяння культурі повторного використання та переробки.

● Утилізація відходів від реконструкції та будівництва. Це можна зробити шляхом впровадження таких заходів, як сортування відходів, використання вторинної сировини та належна утилізація токсичних речовин.

Алгоритм системи поводження з відходами в супермаркетах:

Крок 1. Формування раціональної логістичної системи постачання

Раціональне управління товарними потоками є ключовим елементом запобігання утворенню надлишкових відходів. Це передбачає:

- аналіз календарної потреби у сировині та продуктах;
- пріоритетність локальних закупівель;
- оптимізацію логістичних маршрутів;
- мінімізацію часу зберігання продукції на складах;
- уникнення закупівель великих партій без прогнозованого попиту.

Крок 2. Запобігання утворенню харчових відходів

Необхідно впровадити механізми контролю термінів придатності продукції та своєчасного її вилучення з обігу. Доцільними є:

- організація розпродажів продукції з наближеним терміном придатності;
- передача товарів соціально вразливим групам населення;
- повернення непроданої продукції виробнику.

Крок 3. Підвищення рівня екологічної обізнаності персоналу

Формування екологічної культури серед працівників є необхідною умовою ефективного управління відходами. Рекомендується:

- проведення навчальних заходів;
- створення інформаційних кампаній;
- регулярне оновлення освітніх матеріалів;
- інтеграція принципів сталого розвитку в корпоративну політику.

Крок 4. Інтеграція управління відходами в систему корпоративного менеджменту

Управління відходами має бути невід’ємною частиною системи інтегрованого менеджменту підприємства, з чітко визначеними цілями, відповідальними особами та механізмами моніторингу.

Крок 5. Впровадження системи роздільного збирання відходів

Окрім базового сортування (папір, пластик, метал, дерево), необхідно передбачити розділення органічних відходів за типами:

- необроблені харчові залишки;
- залишки готової їжі;
- зіпсовані продукти.

Також доцільно встановити окремі контейнери для збору одноразового посуду (наприклад, біля кавових точок).

Крок 6. Раціональне використання відходів

Важливо забезпечити повторне використання або утилізацію відходів відповідно до їхнього типу:

- непридатні до споживання фрукти та овочі — для годівлі тварин;
- органічні залишки — для компостування;
- пластик — згідно з маркуванням, для переробки;
- використану каву та чай — для виробництва добрив або інноваційних продуктів;
- косметичні засоби — для навчальних майстер-класів;
- лікарські засоби з наближеним терміном придатності — для соціальних ініціатив;
- алкоголь та преміальні товари — для маркетингових акцій (розіграші, програми лояльності).

Крок 7. Мотивація споживачів

Необхідно розробити систему заохочень для клієнтів, які підтримують екологічні ініціативи компанії, наприклад, через бонусні програми, знижки або участь у соціальних проєктах.

Крок 8. Мотивація персоналу

Стимулювання працівників до участі в екологічних практиках може включати:

- внутрішні конкурси;
- преміювання за ініціативність;
- визнання внеску в корпоративну екостратегію.

Екологізація діяльності приватних домогосподарств

Досліди про утилізацію органічних відходів проводяться з метою розробки ефективних методів утилізації цих відходів.

У контексті переходу до циркулярної економіки та забезпечення сталого розвитку особливого значення набуває впровадження економічних інструментів, спрямованих на підвищення ефективності системи управління відходами. Такі інструменти мають забезпечити дотримання ієрархії поводження з відходами, повне відшкодування витрат на відповідні заходи, а також створення стабільної фінансової бази для реалізації екологічної політики.

До ключових економічних механізмів, що застосовуються з метою екологізації системи поводження з відходами, належать:

1. Диференційоване екологічне оподаткування — передбачає встановлення ставок податку за захоронення відходів на полігонах залежно від їхнього морфологічного складу та класу полігону. Такий підхід стимулює зменшення обсягів захоронення та сприяє розвитку альтернативних методів утилізації.
2. Механізм оплати за фактичний обсяг непридатних до відновлення відходів — передбачає, що утворювачі та володільці відходів сплачують лише за ту частину відходів, яка не може бути піддана повторному використанню або переробці. Це створює економічні стимули для впровадження роздільного збирання та зменшення загального обсягу відходів.
3. Система розширеної відповідальності виробника (РВВ) — застосовується до окремих категорій продукції та відходів, зокрема упаковки,

електроніки, батарейок тощо. Вона передбачає обов'язок виробника забезпечити збір, переробку або утилізацію відходів, що виникають після споживання його продукції. Ефективність РВВ залежить від належного нормативного регулювання та економічної мотивації учасників ринку.

4. Депозитно-заставні системи — спрямовані на стимулювання повернення використаної продукції (наприклад, тари) шляхом надання грошової винагороди за її здачу. Такі системи демонструють високу ефективність у країнах ЄС та можуть бути адаптовані до національного контексту.
5. Податкові пільги для повторного використання та благодійності — передбачають зниження податкового навантаження для суб'єктів господарювання, які передають продукцію на благодійні цілі або забезпечують її повторне використання, що сприяє зменшенню обсягів відходів.
6. Оподаткування екологічно шкідливої продукції — застосовується до товарів, відходи яких мають значний негативний вплив на довкілля. Метою є зменшення їх споживання та стимулювання впровадження екологічно безпечних технологій виробництва та утилізації.
7. Стимулювання використання вторинної сировини — реалізується через підтримку виробництва та споживання продукції, виготовленої з перероблених матеріалів, що сприяє зменшенню навантаження на природні ресурси.
8. Фінансова підтримка інновацій у сфері поводження з відходами — включає надання фіскальних та кредитних пільг для підприємств, що здійснюють наукові дослідження або впроваджують новітні технології у сфері переробки та утилізації відходів.

Застосування вищезазначених економічних інструментів дозволяє не лише підвищити ефективність управління відходами, але й створити умови для розвитку ринку вторинних ресурсів, зменшення екологічного навантаження та досягнення цілей сталого розвитку. Їхнє впровадження має супроводжуватися

належною нормативно-правовою базою, інституційною підтримкою та інформаційно-просвітницькою роботою серед населення та бізнесу [73].

Варіанти компостування для приватних територій

1. Передача органічних відходів на спеціалізовані компостувальні станції

У разі наявності відповідної інфраструктури в межах населеного пункту, одним із ефективних способів утилізації органічних відходів є їх передача на централізовані компостувальні станції. Такий підхід дозволяє забезпечити належну переробку біовідходів із дотриманням санітарно-гігієнічних норм та технологічних вимог.

Процес компостування вимагає попереднього сортування відходів на рівні домогосподарств. Для цього необхідно:

- Ознайомитися з переліком дозволених до компостування матеріалів, що зазвичай надається органами місцевого самоврядування або операторами компостувальних станцій.
- Організувати в побуті окрему ємність для збору органічних фракцій. Регулярне вивезення (кожні 2–3 дні) дозволяє уникнути утворення неприємного запаху.
- Здійснювати викидання органічних відходів виключно у спеціально марковані контейнери, призначені для біовідходів, без використання поліетиленових пакетів або домішок неорганічного походження.

Недотримання вимог до сортування ускладнює подальшу переробку та знижує якість кінцевого продукту — компосту.

2. Домашнє компостування як альтернатива централізованим системам

У разі відсутності доступу до муніципальної інфраструктури, компостування органічних відходів може здійснюватися безпосередньо в межах житлового приміщення. Одним із найбільш адаптованих до квартирних умов методів є використання ЕМ-контейнерів (контейнерів з ефективними мікроорганізмами).

2.1. Вибір та підготовка обладнання

ЕМ-контейнер — це спеціалізована ємність із герметичною кришкою та краном для зливу рідини, яка утворюється в процесі ферментації.

Альтернативно, можна виготовити подібну конструкцію самостійно, використовуючи два пластикові відра, одне з яких має отвори для стікання рідини.

2.2. Використання ефективних мікроорганізмів

Для запуску процесу ферментації застосовуються препарати на основі ефективних мікроорганізмів, зокрема бокаші — суха суміш, яка пригнічує гниття та активує анаеробне розкладання. Препарат вноситься у вигляді тонкого шару поверх кожної нової порції відходів.

2.3. Організація процесу компостування

Контейнер може бути розміщений у будь-якому зручному місці квартири, однак рекомендовано здійснювати завантаження відходів та злив рідини у добре провітрюваному приміщенні. Для зменшення об’єму та прискорення ферментації органічні залишки подрібнюються до розміру 3–5 см. Важливо забезпечити мінімальний доступ повітря до внутрішнього середовища контейнера.

2.4. Результати ферментації

Упродовж двох тижнів відходи проходять стадію ферментації, після чого можуть бути використані як органічне добриво шляхом закладення у ґрунт. Повного компостування в умовах квартири не відбувається, однак отриманий продукт є стабільним і не піддається подальшому гниттю.

3. Вермикомпостування як форма біологічної утилізації органічних відходів

Одним із ефективних способів переробки органічних відходів у побуті є вермикомпостування — процес біоконверсії органіки за участі спеціалізованих видів компостних черв’яків. Цей метод характеризується високою екологічною ефективністю, відсутністю шкідливих викидів та можливістю отримання цінного добрива — біогумусу.

Для організації вермиферми в домашніх умовах доцільно використовувати спеціалізовані багатоярусні контейнери (вермикомпостери), які забезпечують оптимальні умови для життєдіяльності черв’яків. Альтернативно, можна

застосовувати перфоровані пластикові ящики з дренажною системою та піддоном для збору надлишкової рідини. Важливо забезпечити доступ повітря та відведення вологи, що запобігає анаеробним процесам.

Для ефективного старту вермикомпостування рекомендується використовувати популяцію з 2000–2500 особин спеціалізованих порід (наприклад, *Eisenia fetida*, «Старатель», «Червоний каліфорнійський»). Черв'яки мають бути переселені разом із субстратом, у якому вони перебували раніше, що сприяє зниженню стресу та адаптації до нових умов.

Перед внесенням у вермикомпостер органічні відходи необхідно подрібнити до розміру 3–5 см та обробити препаратами на основі ефективних мікроорганізмів (ЕМ-препаратами або бокаші). Це сприяє попередньому ферментуванню сировини та полегшує її засвоєння черв'яками.

Внесення нових порцій органіки здійснюється лише після повного споживання попередньої. Для запобігання розмноженню дрібних комах (зокрема дрозофіл) відходи слід прикривати шаром субстрату, кокосовими матами або вологим папером. Температурний режим, вологість та відсутність шумових подразників є критичними факторами для підтримання активності біомаси.

У результаті діяльності черв'яків утворюється біогумус — високоякісне органічне добриво, придатне для використання в агрономії. Об'єм відходів при цьому зменшується в кілька разів, а кінцевий продукт характеризується стабільністю та відсутністю патогенних мікроорганізмів.

4. Колективне компостування: організаційні та технологічні аспекти

Колективне (спільне) компостування є ефективною формою управління органічними відходами в багатоквартирних будинках, ОСББ, навчальних закладах або громадах.

Для організації компостувального майданчика необхідно обрати ділянку з рівною поверхнею, бажано в затіненому місці. У разі розміщення компостера на відкритому ґрунті слід забезпечити дренаж шляхом розпушення землі. Для захисту від гризунів рекомендується встановлення металевої сітки на дні контейнера.

Оптимальним варіантом є дво- або трисекційні компостери з деревини, що дозволяє чергувати фази накопичення та дозрівання компосту. Розміри секцій мають становити приблизно 1×1×1 м. Конструкція повинна забезпечувати зручний доступ до вмісту та мати окрему секцію для зберігання сухих матеріалів.

У процесі компостування необхідно контролювати:

- Температуру (не вище 60 °C) — у разі перегріву слід перемішати масу або зволожити її.
- Вологість (70–80%) — перевіряється шляхом стискання компосту в руці.
- Баланс вуглецю та азоту (оптимальне співвідношення 25–30:1) — досягається чергуванням «зелених» (азотних) та «коричневих» (вуглецевих) матеріалів.

Технологія закладання шарів:

Перший шар — дренажний (гілки), далі — вуглецевий (сухе листя, сіно), потім — органічні відходи (3–5 см), які обробляються ЕМ-препаратом і накриваються вуглецевим матеріалом. Верхній шар завжди має бути «сухим», що запобігає появі мух.

Компост дозріває протягом 3–5 місяців, залежно від температурних умов. Готовий продукт може містити частково недорозкладені фрагменти, що не знижує його агрономічної цінності. За потреби компост просіюється, а великі частки повертаються до компостера для подальшого дозрівання [74].

Екологізація діяльності сміттєзвалищ

Метою дослідження є розробка комплексної технології поводження з відходами та подальша реалізація екологічно безпечної програми для виснажених звалищ, тому такі основні кроки повинні бути включені:

- Нейтралізація негативного впливу на навколишнє середовище полігону, шляхом перетворення полігону в тополевий ліс
- Створення зони відпочинку на колишньому полігоні
- Створення підприємств комплексної переробки
- Формування біополігону для виробництва природних добрив
- Встановлення біогазових реакторів для виробництва метану

- Зменшити забруднення від стічних вод
- Лісовідновлення території
- Отримання економічної вигоди шляхом використання вторинної сировини

Стратегія поводження з відходами та рекультивації полігону ТПВ:

1. Підготувати поверхню полігону для подальшого використання (вирівняти територію)

2. Зняти 1,5-2 метри шару ґрунту з прилеглої території та засипати полігон.

3. Посадити тополю

Побудова біополігону:

На земельній ділянці необхідно зробити внутрішній дренаж. Мінімальна глибина котловану для монтажу становить приблизно 1600 мм, ширина 200х200 м. Дно вирівнюють гравієм (або піском) на глибину приблизно 25-30 см. Висота видимої частини над рівнем землі приблизно 920 мм. Котлован повинен бути достатньо великий для установки. У глибині також слід зробити запас для незначного вирівнювання. Перед заливкою цементом потрібно виконати ряд підготовчих робіт. Першим ділом необхідно провести геодезичну зйомку ділянки, визначити тип і глибину промерзання ґрунту, кількість і розташування ґрунтових вод. Потім, відповідно до отриманих результатів, визначити правильне навантаження на майбутній цемент.

Монтаж біогазових реакторів

Біогазові реактори можуть являти собою цегляні куполи або збірні резервуари, встановлені над або під землею, залежно від простору, характеристик ґрунту, доступних ресурсів та обсягу утворених відходів. Вони можуть бути побудовані як стаціонарні купольні або плавучі купольні метантенки. У нерухомому куполі об'єм реактора постійний. Коли утворюється газ, він створює тиск і витісняє суспензію вгору в камеру розширення. Коли газ видаляється, суспензія повертається в реактор. Тиск можна використовувати для транспортування біогазу по трубах. У реакторі з плаваючим куполом купол піднімається й опускається разом із виробництвом і відведенням газу. Крім того, він може розширюватися (як повітряна куля). Щоб мінімізувати втрати при

розподілі, реактори слід встановлювати поблизу місць, де можна використовувати газ [75].

6. Налагодження процесу збору сміття та його сортування (створення сортувального підприємства, якщо його немає).

7. Розподіл сміття за класами та відправка його на спеціально обладнані переробні підприємства.

Отримання біодобрив з органічних відходів:

Побудувати полігон для біовідходів, технологія якого заснована на методі компостування (тобто природного розкладання органічних речовин). Органічні відходи поміщають на цементний майданчик і залишають на відкритому повітрі для природного розкладання. Раз на рік ці відходи перевертають, а наступного року їх можна використовувати як добриво. У нашому розумінні біополігон включає допустиму кількість цементних ліній шириною до двох метрів і допустимий діапазон довжини запропонованого полігону. Такий вибір параметрів обумовлений зручністю для експлуатації важкої техніки.

Оцінка виробництва біогазу із звалищ

Кількість біогазу з 1 тонна відходів протягом 20 років дорівнює 30-100 м3 [76].

$$V = S \times h \times d \times V_0 \quad (5.1)$$

де V– загальне виробництво біогазу протягом 20 років; S – площа полігону; h – висота пустого пагорба; d – щільність відходів; V_0– питомий об’єм біогазу (з 1 т відходів).

Для аналізу було вибрано спеціальний полігон поблизу міста Вінниця – Стадницький полігон. Площа полігону становить 16,0128 га, з яких 2 га використовуються для сортувального підприємства.

$$V_{min}=140128\times10\times2300\times30=9.6\times10^{10}(м^3) \quad (5.2)$$

$$V_{max}=140128\times10\times2300\times100=3.2\times10^{11}(м^3) \quad (5.3)$$

V_{min} та V_{max} це мінімальне та максимальне виробництво біогазу протягом 20 років. Отже, За 1 рік $V_{min}=4.8\times10^8$ ($м^3$) та $V_{max}=1.6\times10^{10}$($м^3$). Середнє значення за

1 рік становить 8.2×10^8(м³). Міст метану в біогазі з полігону становить приблизно 60% (4.92×10^9 м³). Вартість 1 м³ метану – 15,50 грн [77].

Отже, за рік ми отримаємо:

$4.92\times10^9 \times 15.50 = 75\ 950\ 000\ 000$ грн.

Середня витрата на 100 км. Цей метан можна використовувати як паливо для транспортування. Середня витрата на 100 км - 9 м. Це означає, що дане кількість метану може забезпечити пересування на відстань 546 000 000 км. Якщо перевести це в газові балоні, то отримаємо: газовий балон об'ємом 50 літрів = 0.05 м³.

При стисканні у 200 разів (200 атмосфер) у балон можна вмістити $200\times0.05 = 10$ м³ метану [78]. Це означає, що ми можемо заправити приблизно 492 000 000 газових балонів.

Розрахунок об'єму органічних відходів з усього полігону:

$$V_{\text{орг}} = S \times h \times d \times k, \tag{5.4}$$

де $V_{\text{орг}}$– обсяг органічних відходів від збору всього полігону за 1 рік (м3); S – площа полігону; h – висота пустого пагорба; d – щільність відходів; k– коефіцієнт органічних відходів (частка органічних відходів із ТПВ).

Коефіцієнт k включає органічні залишки, деревину та папір і дорівнює 0,52.

$$V_{\text{орг}}=140128\times10\times2300\times0.52=1675930880\backslash20 =83796544\ (\text{m}^3) \tag{5.5}$$

Маса органічних відходів:

$$m = \rho \times V_{\text{орг}}, \tag{5.6}$$

де m – маса збору органічних відходів за 1 рік; ρ– щільність органічних відходів; V_{org}– обсяг органічних відходів від збору всього полігону за 1 рік. Щільність органічних відходів дорівнює 0.14 (м^3/т).

$$m = 0.14 \times 83796544 = 11731516(t) \tag{5.7}$$

Біогазові реактори

Розрахунок доходу від біогазу:

$$V_{\text{біогаз}} = m \times n, \tag{5.8}$$

де $V_{\text{біогаз}}$– обсяг доходу від біогазу; m– маса збору органічних відходів протягом 1 року;n– кількість біогазу, що утворюється з 1 тонни органічних відходів.

З 1 тонни органічних відходів утворюється 350 м3 біогазу.

$V_{\text{біогаз}}$= 11731516×350=4106030656(м^3)

Розрахунок об'єму метану, присутнього в біогазі:

$$V_{\text{метан}} = \eta \times V_{\text{біогаз}}, \quad (5.9)$$

де $V_{\text{метан}}$–об'єм метану в біогазі; η– відсоток вмісту метану в біогазі; $V_{\text{біогаз}}$– обсяг доходу від біогазу. Приблизний відсоток вмісту метану в біогазі дорівнює 80%.

$V_{\text{метан}}$=0.8×4 106 030 656=3 284 824 525 (м^3)

Розрахунок вартості метану (дохід після 1 року експлуатації):

$$\text{C} = V_{\text{метан}} \times b, \quad (5.10)$$

де С – вартість метану (грн.); б–1 м3 метану. 1 кубічний метр метану коштував 15,50 грн. С =3 284 824 525 ×15.50=50 914 780 134(UAH).

Розрахунок вартості добрива з біогазових реакторів:

$$\text{C}_\text{a} = \eta_1 \times V_{\text{орг}} \times f, \quad (5.11)$$

де C_a–вартість добрив з біогазових реакторів; η_1– відсоток сухого добрива від кількості органічних відходів; f – вартість добрива з 1 м3.

Приблизний відсоток сухого добрива від усієї кількості органічних відходів дорівнює 25%. Це пояснюється сушінням органічних добрив для подальшого використання, з одного боку, і використанням залишку як субстрату для нового циклу в реакторі, з іншого боку. Вартість добрива з 1 м3 дорівнює 250 грн.

C_a=0.25×83 796 544 ×250=5 237 284 000 (UAH)

Установка біогазових реакторів

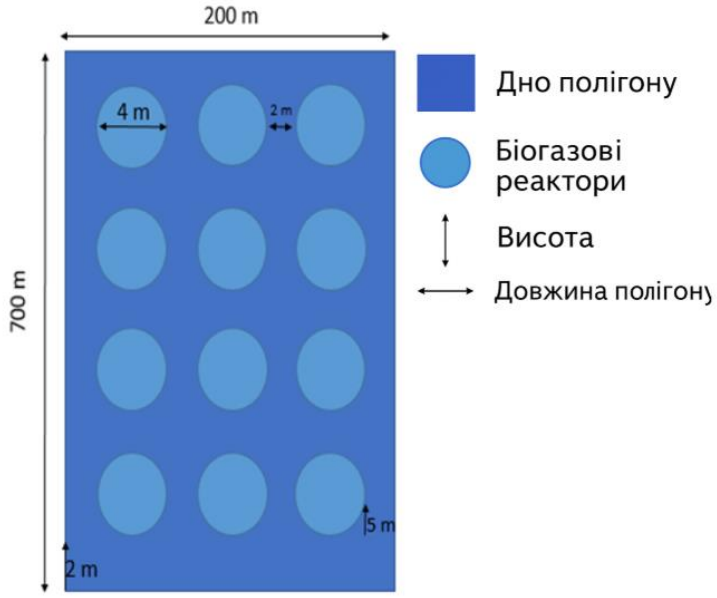


Рис. 5.4. Схема полігону з біогазовими реакторами

$V = \pi \times R^2$=3.14×4 м^2×5 м= 62.8 м^3,

де V – об'єм одного біореактора.

Якщо площа полігону 140 000 м2, то А = 140 000 м2 : (4+2)2 м2 = 3890 – кількість реакторів.

C_1 = 950 у.е. – вартість одного біореактора.

C_2 = 3890×950 у.е. = 3 700 000 у.е. = 110 833 334 UAH.

Цементні блоки

Розрахунок вартості добрива з цементних блоків:

$$C_b = \eta_2 \times V_{\text{орг}} \times f, \qquad (5.12)$$

де η_2 – відсоток внесення добрив від кількості органічних відходів; f – вартість добрива з 1 м3. Приблизний відсоток добрива від усієї кількості органічних відходів дорівнює 95% (відносно вся органічна маса стає добривом).

C_b=0.95×83 796 544×250=19 901 679 200 (UAH)

Монтаж цементних блоків

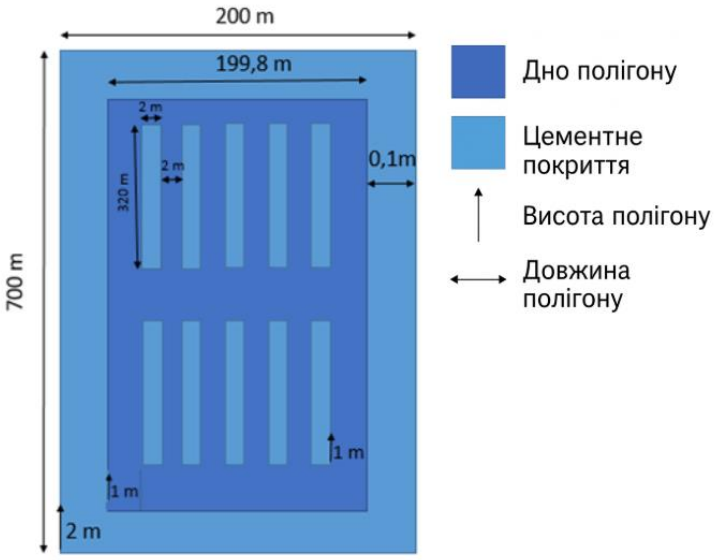


Рис. 5.5. Схема полігону з цементними блоками

S = 140000 м^2, де S - площа багатокутника.

V_1= 140000 м^2 × 0.1 м = 14000 м^3 – об’єм цементу для дна полігону.

V_2 = (200м × 700м × 1,99м) – (199.8м × 699.8м × 1.99м) = 278600м^3 – 278240м^3 = 360 м^3 – об’єм цементу для обрамлення полігону.

V_3 = (2м × 320м × 1м) – (1,8м × 321.8м × 1м) = 640м^3 – 579.2м^3 = 60.8 м^3 – об’єм цементу для обрамлення полігону.

A = 200 м: 4 м = 50 – об’єм цементу на один блок полігону.

$V_{\text{цемент}}$ = 14000 м^3 + 360 м^3 + 50×60.8 м^3 = 17 400 м^3 – об'єм цементу для полігону.

1 тонна цементу коштує приблизно 600 грн. C = 17400 м^3 × 600 = 10 440 000 UAH.

Після формування цілого унікального комплексу ми отримуємо переваги

На національному рівні необхідно проаналізувати економічну роботу побудови цієї системи.

Рис.5.6. Сталий підхід до управління відходами

На полігоні ми можемо встановити цементні блоки для отримання біодобрив або біогазові реактори для виробництва біогазу та отримання біодобрив.

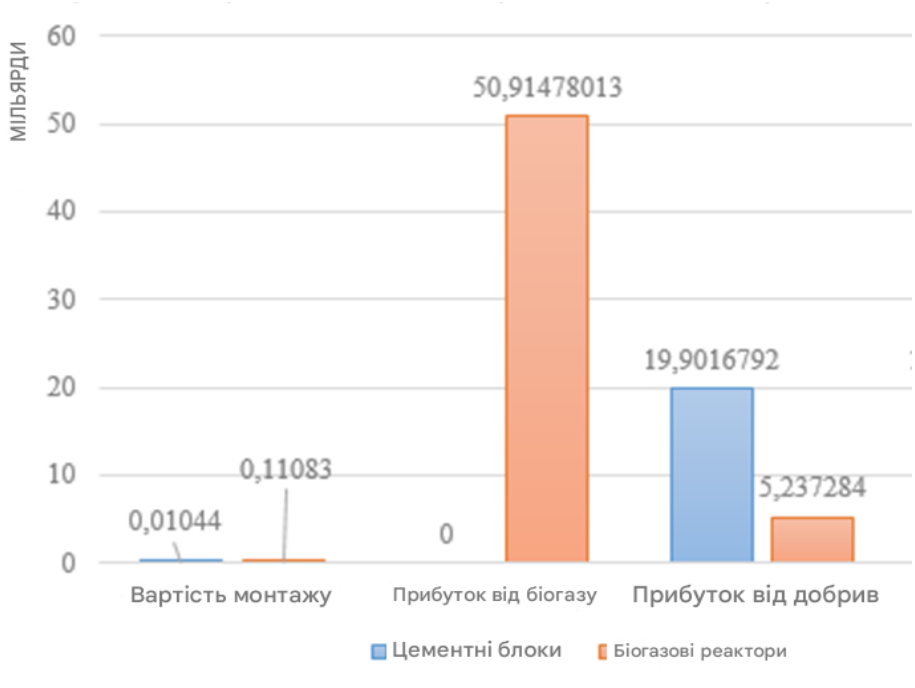


Рис.5.7. Економічна ефективність системи цементних блоків та установки біогазових реакторів

Після порівняльного аналізу економічної ефективності системи цементних блоків і біогазових реакторів ми рекомендуємо встановити в сміттєпереробному комплексі систему цементних блоків для виробництва органічних добрив. Такий

вибір пояснюється тим, що окупність вище, ніж при установці біогазових реакторів, правда, сума чистого доходу нижче, але сама установка дешевше.
У даній науковій роботі ми проаналізували питання поводження з відходами, світовий досвід поводження з відходами та на основі аналізу прототипу розробили сучасну технологію поводження з відходами, яка містить пропозиції щодо подальшої експлуатації території відпрацьованого Стадницького полігону [90].

5.3. Практичні рекомендації щодо покращення системи управління відходами

Сучасна система управління відходами в Україні стикається з численними викликами, серед яких — перевантаження полігонів, низький рівень переробки органічних відходів та недостатня інтеграція екологічних практик у виробничу діяльність. У зв’язку з цим виникає потреба у впровадженні ефективних, науково обґрунтованих рішень, які дозволять зменшити екологічне навантаження та підвищити ресурсну ефективність.

Управління відходами має розглядатися як складова частина системи екологічного менеджменту. Тому важливий комплексний підхід з урахуванням:

- формалізування політики управління відходами на рівні внутрішніх регламентів;
- впровадження системи обліку та моніторингу потоків відходів;
- забезпечення підготовки персоналу з питань сортування та утилізації.

Такий підхід сприяє формуванню системного бачення процесів управління відходами та підвищує відповідальність на всіх рівнях організації. Це дозволяє оптимізувати подальшу утилізацію та зменшити ризики вторинного забруднення.

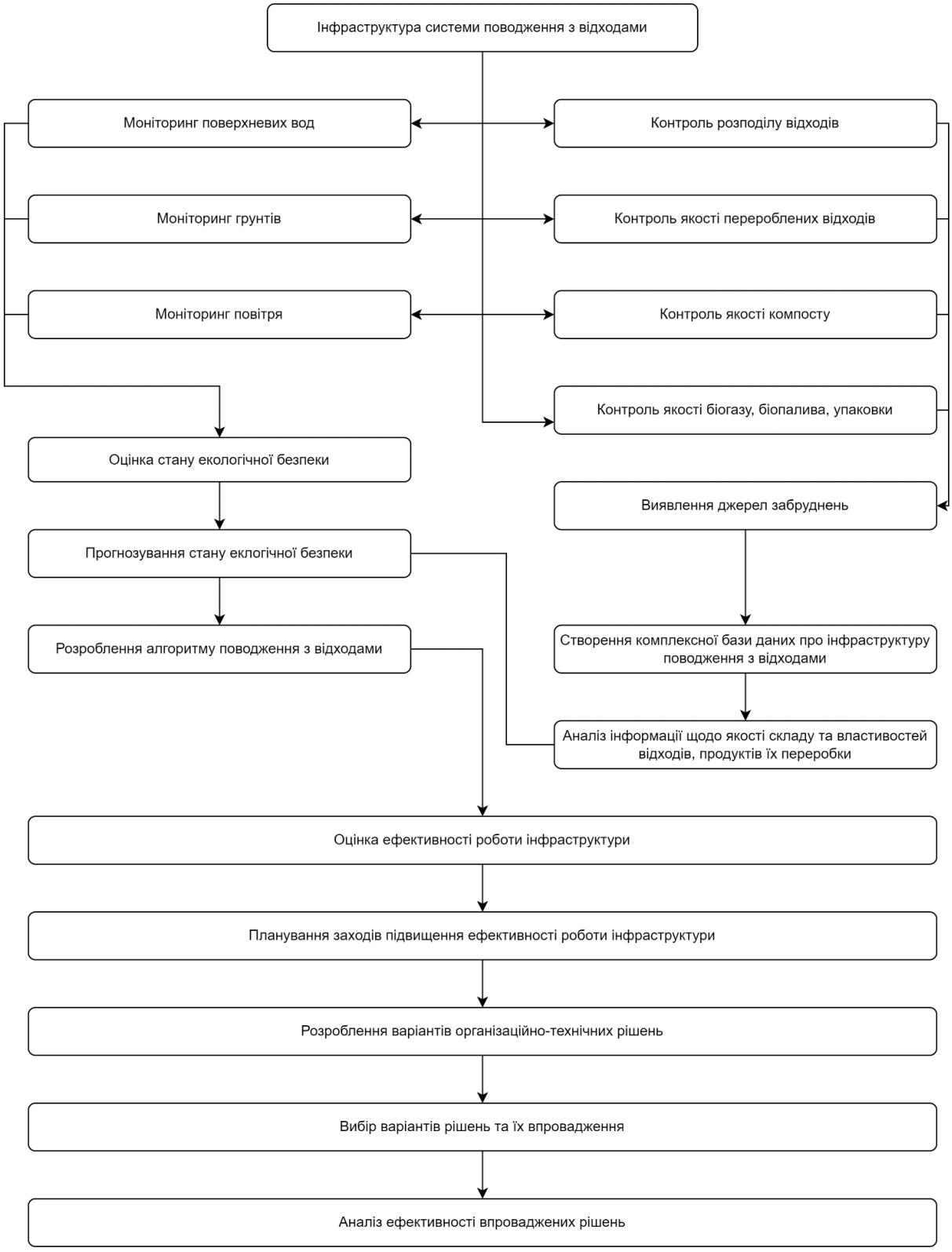


Рис. 5.8. Концептуальна модель системи управління відходами

У сучасних умовах трансформації екологічної політики та переходу до циркулярної економіки, управлінські рішення відіграють стратегічну роль у формуванні ефективної системи поводження з відходами. Їх значення полягає не

лише в організаційній координації процесів, а й у створенні нормативно-інституційного середовища, що стимулює впровадження інноваційних технологій, змінює поведінкові моделі споживачів і забезпечує сталий розвиток територій. До ключових управлінських інновацій, що демонструють високу результативність у міжнародній практиці та мають потенціал для адаптації в Україні, належать:

1. Муніципальні стратегії «нуль відходів» (Zero Waste)

Це концептуальні підходи, що передбачають мінімізацію утворення відходів на всіх етапах життєвого циклу продукції, максимальне повторне використання матеріалів, розвиток інфраструктури для переробки та повну відмову від захоронення. Успішна реалізація таких стратегій потребує міжсекторальної взаємодії, участі громадськості та підтримки з боку місцевої влади. Вони формують нову парадигму управління ресурсами, орієнтовану на запобігання утворенню відходів, а не лише на їх утилізацію.

2. Розширена відповідальність виробника (Extended Producer Responsibility, EPR)

Цей механізм передбачає, що виробники несуть повну відповідальність за екологічні наслідки своєї продукції — від етапу проєктування до утилізації. Впровадження EPR стимулює екодизайн, зменшення використання складних для переробки матеріалів, розвиток зворотної логістики та створення інфраструктури для збору відпрацьованої продукції. У європейських країнах EPR є обов’язковим для упаковки, електроніки, батарейок, шин тощо, і демонструє високу ефективність у зменшенні навантаження на полігони.

3. Цифровізація управління відходами

Використання цифрових технологій дозволяє оптимізувати процеси збору, транспортування, обліку та переробки відходів. Електронні платформи забезпечують прозорість потоків відходів, автоматизують звітність, полегшують взаємодію між муніципалітетами, операторами та споживачами. Зокрема, впровадження QR-кодування контейнерів, GPS-моніторингу транспорту,

мобільних застосунків для сортування та аналітики даних сприяє підвищенню ефективності управління та зменшенню витрат.

4. Інтегроване планування на рівні територіальних громад

Розробка локальних планів управління відходами має базуватися на морфологічному складі відходів, обсягах їх утворення, наявній інфраструктурі та соціально-економічних характеристиках громади. Такий підхід дозволяє адаптувати стратегії до місцевих умов, визначити пріоритети інвестування, оптимізувати логістику та забезпечити ефективне використання ресурсів. Інтегроване планування також передбачає участь громадськості у прийнятті рішень, що підвищує рівень довіри та відповідальності.

5. Освітні та інформаційні кампанії

Формування екологічної свідомості населення є необхідною передумовою для успішного впровадження роздільного збирання та зменшення кількості відходів. Ефективні інформаційні кампанії мають бути системними, візуально привабливими, адаптованими до різних вікових груп і каналів комунікації. Особливу роль відіграють освітні програми в школах, тренінги для працівників підприємств, соціальні мережі та публічні заходи, що сприяють формуванню культури відповідального споживання.

Таким чином, управлінські інновації є невід’ємною складовою ефективної системи поводження з відходами, що поєднує технологічні, економічні та соціальні інструменти. Їх впровадження дозволяє не лише зменшити екологічне навантаження, а й створити нові можливості для розвитку місцевих громад, бізнесу та екологічної освіти.

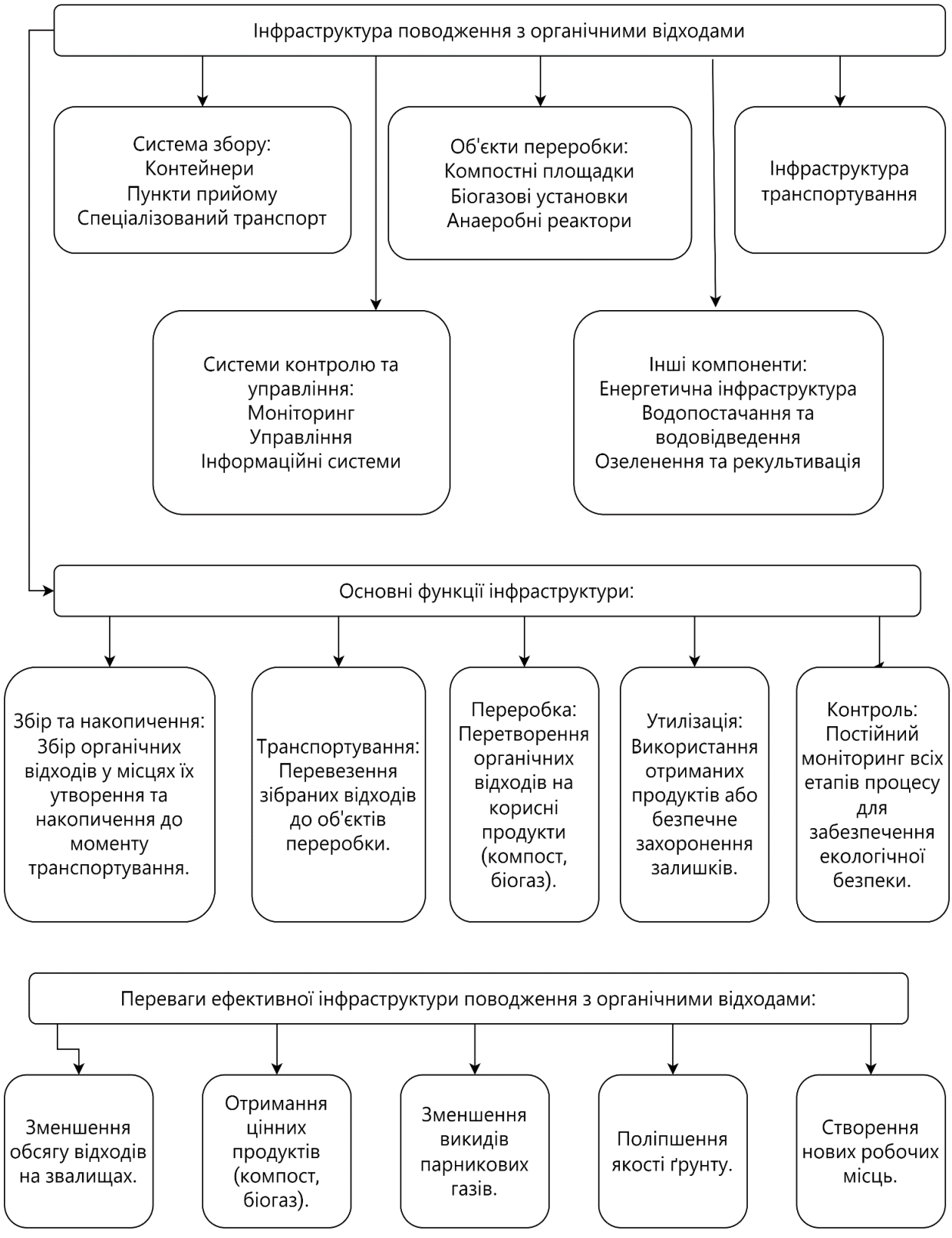


Рис. 5.9. Схема інфраструктури поводження з органічними відходами

Аналіз інфраструктури поводження з органічними відходами вимагає системного підходу, оскільки вона охоплює кілька взаємопов’язаних етапів — від джерела утворення до кінцевого використання продуктів переробки.

Розглянемо її з точки зору ефективності, сталості, економіки та соціального впливу.

1. Структурна цілісність

Інфраструктура поводження з органікою зазвичай включає: збір → транспортування → переробку → використання. Якщо хоча б один із цих елементів не працює злагоджено, система втрачає ефективність. Наприклад, наявність компостного заводу не має сенсу без якісного сортування на джерелі.

2. Економічна доцільність

Органічні відходи мають низьку щільність і високу вологість, що робить їх транспортування дорогим. Тому локалізація обробки (наприклад, мікрокомпостери в громадах) значно підвищує економічну ефективність. Біогазові установки можуть бути рентабельними лише при стабільному потоці сировини.

3. Екологічна ефективність

Правильна переробка органіки зменшує викиди метану на полігонах, покращує якість ґрунтів і знижує потребу в хімічних добривах. Але якщо відходи не сортуються належним чином, це призводить до забруднення компосту або зниження ефективності біогазу.

4. Законодавча база

Успішна інфраструктура базується на чітких правилах: обов’язкове сортування, штрафи за порушення, стимули для бізнесу. Якщо законодавство не підтримує систему — вона не буде працювати навіть за наявності технічних рішень.

Висновки до розділу 5

У розділі 5 було проведено всебічний аналіз практичних кейсів застосування розробленої технології, зокрема було розглянуто наступні аспекти:

1. Дослідження рішень управління кінцевого продукту технології:

- Вивчено можливості використання кінцевих продуктів технології утилізації органічних відходів, таких як компост та біогаз.
- Розроблено рекомендації щодо ефективного використання кінцевих продуктів для підвищення їхньої економічної та екологічної цінності.

2. Екологізація діяльності супермаркетів:

- Досліджено можливості впровадження технологій утилізації органічних відходів у супермаркетах.
- Розроблено рекомендації щодо зменшення обсягів відходів та підвищення ефективності їхньої утилізації у супермаркетах.

3. Екологізація приватних домогосподарств:

- Вивчено можливості впровадження технологій утилізації органічних відходів у приватних домогосподарствах.
- Розроблено рекомендації щодо зменшення обсягів відходів та підвищення ефективності їхньої утилізації у приватних домогосподарствах.

4. Екологізація сміттєзвалищ:

- Досліджено можливості зменшення негативного впливу сміттєзвалищ на довкілля за допомогою впровадження технологій утилізації органічних відходів.
- Розроблено рекомендації щодо покращення управління сміттєзвалищами та зменшення їхнього негативного впливу на довкілля.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання розроблення ефективної екологічно безпечної технології утилізації органічних відходів, що забезпечує раціональне використання природних ресурсів, додержання нормативів шкідливих впливів на довкілля та створення умов для сталого розвитку.

Основні результати дослідження відповідають поставленим завданням та визначають перспективи подальших досліджень у сфері управління відходами.

1. Проведено системний аналіз сучасних методів управління органічними відходами, виявлено, що в Україні органічна фракція становить близько 45–60% від загального обсягу ТПВ, що створює значне навантаження на довкілля. Відсутність роздільного збору та інфраструктури для оброблення органіки призводить до високих викидів парникових газів, зокрема метану.

2. Проведена серія експериментальних досліджень з метою встановлення закономірностей біорозкладу харчових відходів в електричному компостері. Доведено, що використання електричного компостера дозволяє:

• скоротити об’єм органічних відходів у 4–6 разів;

• досягти середнього зниження маси харчових відходів на 70–85% залежно від типу сировини та температурного режиму;

• за температури 120 °C забезпечити ефективну деструкцію органіки без утворення небезпечних сполук.

3. Побудовано математичну модель процесу дегідратації біовідходів у компостері, яка відображає динаміку зміни маси відходів залежно від часу, температури та початкової вологості. За допомогою методу найменших квадратів встановлено формулу для визначення коефіцієнта дегідратації, що дозволяє прогнозувати втрату маси з точністю до ±5%.

4. Визначено, що отриманий сухий компост містить до 45% органічного вуглецю, 1,2% азоту та має оптимальне співвідношення C:N близько 25:1, що є придатним для подальшого використання як ґрунтового добрива.

5. Розраховано, що при використанні одного побутового компостера на 2 кг органіки/добу можна щомісячно зменшити обсяг ТПВ на 60 кг, зменшити викиди метану на 13–15 кг CO_2-еквіваленту.

6. Розроблено практичні рекомендації щодо вдосконалення системи управління відходами в Україні, які включають: вдосконалення роздільного збору відходів; розроблення регіональних планів; створення мереж компостування та центрів повторного використання; екологізація освіти; економічні стимули.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Bank. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 [Електронний ресурс]. – Washington, DC: The World Bank, 2018. – Режим доступу: https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste

2. ReFED. A Roadmap to Reduce U.S. Food Waste by 20 Percent [Електронний ресурс]. – ReFED, 2016. – Режим доступу: https://refed.org/

3. Утилізація харчових відходів та продуктів харчування [Електронний ресурс] // KF Systems. – Режим доступу: https://kf-systems.com.ua/blog/utylizatsiia-kharchovykh-vidkhodiv-ta-produktiv-kharchuvannia

4. Велика Ідея. Побутові відходи: виклики для України та світу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://biggggidea.com/practices/prosmittya-pobutovi-vidhodi-vikliki-dlya-ukrani-ta-svitu/

5. Мазурак О. Т. Екологічні аспекти утилізації органічних відходів [Електронний ресурс] // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Режим доступу: https://nv.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/view/665

6. Меннінг Л. Управління харчовими відходами: огляд ділової практики роздрібних торговців та її наслідки для стійкої вартості

7. Організація Об'єднаних Націй. Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/Agenda2030UA.pdf

8. Рибалова О. В. Курс лекцій: для студентів денної форми навчання за спеціальністю 101 «Екологія», освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр». – Харків: НУЦЗУ, 2016. – С. 53–72.

9. Сучасні методи забезпечення аналітичного контролю та ідентифікації відходів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://stud.com.ua/123082/ekologiya/suchasni_metodi_zabezpechennya_analitichnogo_kontrolyu_identifikatsiyi_vidhodiv

10. Всеукраїнське дослідження PAEW-2024: громади і відходи. Презентовано результати [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ukraine-oss.com/doslidzhennya-vseukrayinske-doslidzhennya-paew-2024-gromady-i-vidhody-prezentovano-rezultaty/

11. Львівська міська компост-станція – перша централізована система збору і переробки органіки [Електронний ресурс] // Zero Waste Lviv. – Режим доступу: https://zerowastelviv.org.ua/lviv-compost-station/

12. Zero Waste Europe. Ukraine – Organic Waste Management Overview [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zerowasteeurope.eu/wp-content/uploads/2025/04/Ukraine-UA.pdf

13. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mcl.kiev.ua/wp-content/uploads/2020/10/nacionalna-strategija-upravlinnja-vidhodami-do-2030-roku-_13-07-2017.pdf

14. Директива Європейського Парламенту та Ради 2008/98/ЄС про відходи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098

15. Закон України «Про управління відходами» // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 1998. – № 36–37. – Ст. 242.

16. Закон України «Про житлово-комунальні послуги» // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2004. – № 47. – Ст. 514.

17. Закон України «Про місцеве самоврядування в Україні» [Електронний ресурс] // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 1997. – № 24. – Ст. 170. – Режим доступу: https://komsamovr.rada.gov.ua/uploads/documents/42345.pdf

18. Постанова Кабінету Міністрів України від 10 грудня 2008 р. № 1070 «Про затвердження Правил надання послуг з поводження з побутовими відходами» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakononline.com.ua/documents/show/303284___483783

19. Постанова Кабінету Міністрів України від 16 листопада 2011 р. № 1173 «Питання надання послуг з вивезення побутових відходів» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakononline.com.ua/documents/show/332875___702086

20. Постанова Кабінету Міністрів України від 21 липня 2005 р. № 631 «Про затвердження Порядку проведення конкурсу з надання житлово-комунальних послуг» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.kmu.gov.ua/npas/19195245

21. Закон України «Про відходи» від 5 березня 1998 р. № 187/98-ВР (зі змінами і доповненнями). – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98-%D0%B2%D1%80

22. Закон України «Про публічні закупівлі» // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2015. – № 32. – Ст. 314. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/922-19

23. Інтерв'ю міністра захисту довкілля та природних ресурсів України Руслана Стрільця виданню Delo.ua [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.kmu.gov.ua/news/interviu-ministra-zakhystu-dovkillia-ta-pryrodnykh-resursiv-ukrainy-ruslana-striltsia-vydanniu-deloua

24. Закон України «Про забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії» // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2003. – № 24. – Ст. 170. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15

25. В Україні за рік запрацювало 28 виробників біогазу з агросировини [Електронний ресурс] // Куркуль. – Режим доступу: https://kurkul.com/news/27225-v-ukrayini-za-rik-zapratsyuvalo-28-virobnikiv-biogazu-z-agrosirovini

26. План зовнішніх інвестицій ЄС (EIP) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ec.europa.eu/neighbourhood-enlargement/european-neighbourhood-policy/eip_en

27. Тодорович О. С. Рішення щодо контактної їжі з пластиком // Наука для сталого розвитку: матеріали конгресу (Київ, 2019 р.). – Київ, 2019. – С. 373–377.

28. Oregon State University. Coffee Grounds Perk Up Compost Pile With Nitrogen [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://today.oregonstate.edu/archives/2008/jul/coffee-grounds-perk-compost-pile-nitrogen

29. Про органічні відходи [Електронний ресурс] // Zero Waste Lviv. – Режим доступу: https://zerowastelviv.org.ua/pro-orhanichni-vidkhody/

30. Діоксинова проблема сміттєспалювання [Електронний ресурс] // Національний університет «Львівська політехніка». – Режим доступу: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/aug/14417/1709523p7-p13.pdf

31. SAF Україна. Біоенергетика в Європі та скорочення викидів парникових газів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://saf.org.ua/news/2225/

32. EPA. Methane: Overview of greenhouse gases [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#:~:text=Methane%20(CH4)%3A%20Methane,in%20municipal%20solid%20waste%20landfills.

33. Environment Go! Екологічний вплив звалищ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.environmentgo.com/environmental-impacts-of-electronic-waste/

34. Механіко-біологічна переробка сміття у Львові [Електронний ресурс] // Збруч. – Режим доступу: https://surl.li/pjjesg .

35. Биков М. Компостування: ефективно, екологічно, корисно для ґрунтів [Електронний ресурс] // SuperAgronom.com. – 2017. – Режим доступу: https://superagronom.com/blog/115-kompostuvannya-efektivno-ekologichno-korisno-dlya-gruntiv

36. Голубко Е. Екологічні аспекти компостування [Електронний ресурс] // Репозиторій Львівського національного аграрного університету. – 2023. – Режим доступу: https://surl.li/dhmbzh

37. EPA. Methane: Overview of greenhouse gases [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases

38. BigRentz. Smart Waste Management [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.bigrentz.com/blog/smart-waste-management

39. Global Waste Management Outlook 2024 [Електронний ресурс] // United Nations Environment Programme. – Режим доступу: https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024

40. У ЄС щорічно на вторинну сировину переробляється 61 млн тонн ТПВ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ec.europa.eu/environment/waste/framework/index_en.htm

41. Директива Європейського Парламенту та Ради 2008/98/ЄС про відходи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098

42. UNEP. Waste-to-Energy: Considerations for Informed Decision-Making. – Nairobi: United Nations Environment Programme, 2019.

43. Eurostat. Municipal waste by waste category [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ec.europa.eu/eurostat/

44. Zero Waste Europe. Case studies [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zerowasteeurope.eu/

45. Ministry of the Environment Japan. Recycling of Food Waste [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.env.go.jp/

46. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Відходи та небезпечні речовини [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mepr.gov.ua/timeline/Vidhodi-ta-nebezpechni-rechovini.html

47. Мінрегіон. Роз’яснення Мінрегіону про особливості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.minregion.gov.ua/press/news/rozyasnennya-minregionu-pro-osoblyvo/

48. Органи місцевого самоврядування покривають близько 50 відсотків інвестиційних витрат на системи утилізації відходів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.kmu.gov.ua/news/organ-miscevogo-samovryaduvannya-pokrivaye-50-vidsotkiv-investiciy

49. Amazon. 12 Pieces Activated Carbon Filters Compost Bin Replacement Filters [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.amazon.com/Pieces-Activated-Filters-Compost-Replacement/dp/B076J7PN8W

50. Danio. Губчатий фільтр з карбоном для фільтра Powerline 2052 і 2252 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://danio.com.ua/ua/product/gubchatyiy-filtr-s-karbonom-dlya-filtra-powerline-2052-i-2252

51. UB.ua. Фільтри для електричного компостера FoodCycler [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ub.ua/market/view/24215196/all/filtri-dlya-elektrichnogo-komposteru-foodcycler/

52. Carbon filtering [Електронний ресурс] // Wikipedia. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_filtering

53. Molekule. Activated Carbon Air Filters: How Do They Work? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://molekule.com/blogs/all/activated-carbon-air-filter

54. Amazon. 12 Pieces Activated Carbon Filters Compost Bin Replacement Filters [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.amazon.com/Pieces-Activated-Filters-Compost-Replacement/dp/B076J7PN8W

55. Amazon. Airthereal Replacement Activated Carbon Filters for Revive R500 Electric Kitchen Waste Composter [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.amazon.com/Airthereal-Replacement-Activated-Electric-Composter/dp/B0BQYD9SXK

56. Amazon. IUHAND Filters for Electric Kitchen Composter, Compost Bin Kitchen Replacement Carbon Filters [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

https://www.amazon.com/IUHAND-Filters-Electric-Composter-Replacement/dp/B0BRKM3MHG

57. Southern Living. How To Use Boiled Egg Water In The Garden [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.southernliving.com/garden/eggshells-in-garden

58. Як використовувати яєчну шкаралупу в саду [Електронний ресурс] // Apartment Therapy. – Режим доступу: https://www.apartmenttherapy.com/eggshells-in-the-garden-why-you-should-start-saving-yours-258269

59. Anchenggy. How to Speed Up Composting [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.anchenggy.com/blog/how-to-speed-up-composting.html

60. Шандрівська О. Є., Курин А. Р. Оцінка виробничого та експортно-імпортного потенціалу ринку цукру // Проблеми економіки та управління. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2024. – С. 138–154. – Режим доступу: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2024/nov/36632/vse20242-138-154.pdf

61. Сумський державний університет. *Основи гігієни харчування та здорового харчування* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pubhealth.med.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/02/MI-T3-4-Basics-of-food-hygiene-and-healthy-eating.pdf

62. Trendradar [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.packaging-360.com/whitepaper/trendradar-2021/

63. Havenko S. F., Savchenko O. M. Нові можливості «розумного» і «активного» пакування // *Кваліlогія книги*. – 2012. – № 2 (22). – С. 8.

64. Havenko S. F., Savchenko O. M. Функціональність та сфери застосування розумного пакування // *Кваліlогія книги*. – 2009. – № 2. – С. 73–79.

65. Havenko S. F. Сучасні технології захисту паковань від підробки // *Упаковка*. – 2017. – № 6. – С. 33–35.

66. Havenko S., Kotmalova O., Petryk P. Технологія виробництва паковань із застосуванням фарб і лаків запашних // *Опакування*. – 2013. – № 7. – С. 57–61.

67. Havenko S. F., Savchenko O. M. Аналітичні дослідження основних етапів життєвого циклу паковань // *Кваліlогія книги*. – 2013. – № 2 (24). – С. 22–28.

68. Ferreira A. P., Oliveira M. A. P. P., Sousa M. A. P. Утворення та управління відходами в секторі роздрібної торгівлі: огляд літератури [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/317635269_ENVIRONMENTAL_ASPECTS_OF_ORGANIC_WASTE_RECYCLING/fulltext/5944d41fa6fdccb93ab5b793/ENVIRONMENTAL-ASPECTS-OF-ORGANIC-WASTE-RECYCLING.pdf

69. Wageningen University & Research. Food Waste [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: https://www.wur.nl/en/research-results/research-institutes/food-biobased-research/research-themes/food-waste.htm

70. Wageningen University & Research. Food Waste [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.wur.nl/en/research-results/research-institutes/food-biobased-research/research-themes/food-waste.htm

71. ReFED. Slow Progress, Big Opportunities: Insights from ReFED's Food Loss and Waste Estimates for 2022 [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: https://refed.org/articles/slow-progress-big-opportunities-in-food-waste-reduction-insights-from-refed-s-food-loss-and-waste-estimates-for-2022/

72. one5c. Food waste in supermarkets and grocery stores [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: https://one5c.com/food-waste-supermarkets-136944209/

73. Міністерство розвитку громад та територій України. Пріоритет уряду – ефективний ринок поводження з відходами: роз'яснення Мінрегіону [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: https://www.minregion.gov.ua/press/news/prioritet-uryadu-efektivniy-rinok-povodzhennya-z-vidhodami-roz-yasnennya-minregionu/

74. Почни з органіки: що таке компостування та чому воно рятує нашу планету [Електронний ресурс] // ШоТам. – 2025. – Режим доступу: https://shotam.info/pochny-z-orhaniky-shcho-take-kompostuvannia-ta-chomu-vono-riatuie-nashu-planetu/

75. Akvopedia. Biogas Reactor [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу: https://akvopedia.org/wiki/Biogas_Reactor

76. Асоціація газовидобувних підприємств України. Gas Prices [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: https://agpu.org.ua/en/analytics/gas-prices

77. Engineering ToolBox. Compression and Expansion of Gases [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу: https://www.engineeringtoolbox.com/compression-expansion-gases-d_605.html

78. Todorovych O., Pavliukh M., Syrotina O. Strategy of Exhaust Municipal Waste Landfill [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу: https://www.semanticscholar.org/paper/STRATEGY-OF-EXHAUST-MUNICIPAL-WASTE-LANDFILL-Pavliukh-Syrotina/dbcf5cc161edf274813cc99ff509d5c7a19f0600

ДОДАТКИ

УКРАЇНА
КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО
ЗВЯГЕЛЬСЬКОЇ МІСЬКОЇ РАДИ
«ЗВЯГЕЛЬСЕРВІС»

вул. Житомирська, 45
м. Звягель
Житомирська область
11706, Україна
тел. (067) 315-02-85

код - 36229211
р/рUA673052990000026001026401782
АТ КБ «Приватбанк»
email:kpzvmr.gitloservis@ukr.net

від « » 2025 року №

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Результати дисертаційного дослідження аспірантки Горбачової Олени Сергіївни на тему: "*Розроблення технології утилізації органічних відходів*" на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 – Екологія впроваджені в діяльності на Комунальному підприємстві Звягельської міської ради "ЗВЯГЕЛЬСЕРВІС"

Зокрема, з метою подальшого зменшення впливу на довкілля було використано аналіз систем рекультивації полігону твердих побутових відходів. Для покращення системи управління відходами взято до уваги комплексну систему, запропоновану в дисертації, з урахуванням різних підходів до подальшого використання відходів як вторинної сировини, в тому числі деталізація шляхів використання органічної фракції.

Директор Анатолій РОМАНЧУК

ВИКОНАВЧИЙ КОМІТЕТ
ЗВЯГЕЛЬСЬКОЇ МІСЬКОЇ РАДИ
вул. Шевченка,16, м. Звягель,Звягельський район, Житомирська область, 11700
тел. (04141) 3-54-15 код ЄДРПОУ 04053571
e-mail: zviahelrada@zviahelrada.gov.ua,https://info.nvrada.gov.ua

_____ №

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Результати дисертаційного дослідження аспірантки Горбачової Олени Сергіївни на тему: "*Розроблення технології утилізації органічних відходів*" на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 – Екологія впроваджені в діяльності Виконавчого комітету Звягельської міської ради.

Зокрема, під час підготовки пропозицій проведення заходів до міської ради використано аналітичні матеріали щодо розроблення практичних підходів в комплексному управлінні відходів.

Проведення тематичних зборів здійснювалося з використанням результатів та пропозицій дисертаційної роботи щодо законодавчої бази у сфері управління відходами, класифікації відходів та аналіз методів поводження з відходами з подальшим формуванням комплексного покрокового підходу, що сприяло в тому числі і підвищенню обізнаності.

Заступник міського голови Дмитро ГУДЗЬ

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. президента Державного некомерційного підприємства "Державний університет "Київський авіаційний інститут"

_____ Ксенія СЕМЕНОВА
(підпис)

"03" 05 2025 року

М.П.

АКТ

Комісія у складі:

голови – (проректор з наукових досліджень та трансферу технологій, д.т.н., проф. *ГНАТЮК Сергій Олександрович*);

членів комісії: – (завідувач кафедри екології, д.т.н., проф. *ДУДАР Тамара Вікторівна*);
– (заступник декана з наукової роботи факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій, д.т.н., проф. *ТИХЕНКО Оксана Миколаївна*);

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри екології державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут».

Горбачової Олени Сергіївни

на тему: "*Розроблення технології утилізації органічних відходів*"

на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 Екологія

впроваджені в діяльність державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут».

Зокрема, під час підготовки провозиций курсу лекцій «Утилізація та рекуперація відходів», використано результати дослідження для розроблення навчальних матеріалів, що охоплюють сучасні методи утилізації органічних відходів, їх рециклінг та перероблення. У межах курсу лекцій результати дисертаційного дослідження були використані для підготовки практичних занять, де здобувачі матимуть можливість застосовувати отримані знання на практиці, аналізуючи реальні кейси та розроблявочи власні проєкти з утилізації органічних відходів.

Голова комісії: д.т.н., проф. _____ Сергій ГНАТЮК
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Члени комісії:

д.т.н., проф. _____ Тамара ДУДАР
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

д.т.н., проф. _____ Оксана ТИХЕНКО
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)