

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СИСА ТЕТЯНА МИКОЛАЇВНА

УДК 502.174.1:[628.4.032+662.641]-033.2(043.3)

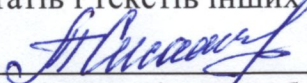
ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПОБУТОВИХ
ВІДХОДІВ ІЗ РОЗРОБЛЕННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ СУМІШЕЙ**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Спеціальність 183 – Технології захисту навколишнього середовища
Галузь знань 18 – Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

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


Т.М. Сиса
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник – Голік Юрій Степанович, кандидат технічних наук, доцент

Полтава – 2026

Анотація

Суса Т.М. Удосконалення технології перероблення побутових відходів із розробленням композиційних сумішей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища» (18 – Виробництво та технології). – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Міністерство освіти і науки України, Полтава, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального питання науково-прикладного характеру в напрямі технології захисту навколишнього середовища – удосконалення технології перероблення побутових відходів із розробленням композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини для забезпечення потреб об'єктів малої теплоенергетики.

У результаті проведення комплексу теоретичних та експериментальних досліджень у дисертації запропоновано положення та рекомендації, які дозволяють запобігти забрудненню навколишнього середовища шляхом удосконалення технології перероблення побутових відходів, що входить в систему управління побутовими відходами. Результати роботи пройшли достатню апробацію та мають упровадження, що підтверджено відповідними актами.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й завдання досліджень, визначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації, структуру та обсяг роботи.

Перший розділ присвячено комплексному аналізу теоретичних засад щодо управління відходами, нормативно-правової бази та існуючих підходів до поводження з побутовими відходами на міжнародному й національному рівнях. По-перше, розглянуто теоретичні основи управління побутовими відходами. По-друге, здійснено аналіз нормативно-правового забезпечення Європи та України у сфері поводження з відходами. По-третє, розкрито сучасні практики управління

відходами в світі та можливі шляхи реалізації міжнародного досвіду у сфері управління відходами на території України з акцентом на ефективні моделі циркулярної економіки. Проаналізовано, що хімічний склад торфу зумовлює його адсорбційну здатність за рахунок вуглецю, кисню та водню, які утворюють сполуки: карбоксильні групи, фенольні гідроксильні групи, гумінові та фульвокислоти.

У **другому** розділі наведено детальний опис методик і методів, за допомогою яких проводилося дослідження. Досліджено морфологічний склад побутових відходів за чотирма сезонами року на території селища Котельва Полтавського району Полтавської області. Описано методику проведення факторного аналізу створення композиційних сумішей й методики визначення теплотехнічних показників: вологості, зольності, нижчої теплоти згоряння з посиланнями на стандарти та нормативні документи, за якими проводились вимірювання.

Третій розділ присвячено питанню енергоефективності регіону як одному із ключових напрямів сталого розвитку. У розділі наведено отримання, аналіз та узагальнення результатів експериментальних досліджень, що визначають енергетичну цінність і екологічну безпечність використання побутових відходів і торфу як альтернативного палива. Основну увагу зосереджено на експериментальному дослідженні теплотехнічних показників побутових відходів і торфу: вологості, зольності, нижчої теплоти згоряння. Висвітлено екологічні характеристики процесу спалювання горючих фракцій побутових відходів і торфу, а саме концентрації забруднювальних речовин у димових газах. Проведено аналіз отриманих результатів, який включає побудову графічних залежностей теплоти згоряння побутових відходів і торфу від їх вологості та зольності. Встановлено, що зі збільшенням вологості й зольності відходів і торфу прямо пропорційно знижується їх теплота згоряння.

Четвертий розділ включає наукове обґрунтування створення раціональних композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів і торфу з метою удосконалення технології перероблення побутових відходів. З даною

метою розроблено математичну модель, що визначила співвідношення раціональних параметрів технологічного процесу. Розглянуто екологічний аспект впровадження розроблених композиційних сумішей, зокрема, можливість їх використання в твердопаливному котлі ТОВ «Понори» типу Alter DUO PLUS. Обґрунтовано вибір технології перероблення побутових відходів шляхом розроблення композиційних сумішей. Сформовано практичні рекомендації щодо використання композиційних сумішей в твердопаливних котлах, які включають раціональні рецептури композиційних сумішей, умови їх ефективного використання та пропозиції щодо зниження концентрацій вуглецю (II) оксиду, азоту (II) оксиду, азоту (IV) оксиду, сульфур (IV) оксиду.

Проблема управління відходами, особливо в контексті збільшення обсягів побутових відходів в Україні, стала ще більш актуальною на тлі військових дій. Водночас, труднощі виникають у малих населених пунктах, де відсутні умови для ефективного управління відходами, що часто призводить до утворення несанкціонованих сміттєзвалищ. Тому удосконалення технології перероблення побутових відходів шляхом розроблення композиційних сумішей на основі побутових відходів і торфу робить акцент на вирішення проблеми енергетичного характеру, з мінімальним впливом на навколишнє природне середовище та зменшення обсягів накопичення відходів.

Дисертація є завершеним науковим дослідженням, яке містить теоретичні положення, науково-методичні підходи та практичні рекомендації щодо удосконалення технології перероблення побутових відходів із розробленням композиційних сумішей.

Наукові положення, висновки і рекомендації, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Внесок автора в наукові праці, опубліковані в співавторстві, конкретизовано в списку публікацій.

Ключові слова: побутові відходи, торф, управління відходами, композиційні суміші, Полтавський регіон, зола, вологість, теплотвірна здатність, ресурсний потенціал, сталий розвиток, екологічна безпека, об'єкти інфраструктури, енергоефективність, циркулярна економіка.

Abstract

Sysa T.M. Improving household waste processing technology through the development of composite mixtures. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 183 «Environmental Protection Technologies» (18 – Production and Technologies) – National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». Ministry of Education and Science of Ukraine, Poltava, 2026.

This dissertation addresses a pressing scientific and applied issue in the field of environmental protection technology: improving household waste processing technology through the development of composite mixtures based on combustible fractions of household waste and peat from Poltava region deposits to meet the needs of small-scale thermal power facilities.

As a result of a comprehensive set of theoretical and experimental studies, the dissertation proposes provisions and recommendations that allow for the prevention of environmental pollution by improving household waste processing technology, which is part of the household waste management system. The results of the work have undergone sufficient testing and have been implemented, as confirmed by relevant documents.

The **introduction** justifies the relevance of the dissertation topic, formulates the research objectives and tasks, identifies the scientific novelty and practical value of the findings, details the candidate's personal contribution, describes the testing of the dissertation's findings, and outlines the structure and scope of the work.

The **first** chapter is devoted to a comprehensive analysis of the theoretical foundations of waste management, the regulatory framework, and existing approaches to municipal solid waste management at the international and national levels. First, the theoretical foundations of municipal solid waste management are examined. Second, an analysis is conducted of the regulatory and legal frameworks in Europe and Ukraine regarding waste management. Third, current global waste management practices are

examined, along with possible ways to implement international experience in waste management in Ukraine, with an emphasis on effective circular economy models. It was found that the chemical composition of peat determines its adsorption capacity due to carbon, oxygen, and hydrogen, which form compounds such as carboxyl groups, phenolic hydroxyl groups, humic acids, and fulvic acids.

The **second** chapter provides a detailed description of the techniques and methods used in the study. The morphological composition of household waste was examined across the four seasons of the year in the village of Kotelva, Poltava District, Poltava Oblast. The paper describes the methodology for conducting factor analysis to create composite mixtures and the methods for determining thermal properties – moisture content, ash content, and lower heating value – with references to the standards and regulatory documents used to perform the measurements.

The **third** chapter is devoted to the issue of energy efficiency in the region as one of the key areas of sustainable development. The chapter presents the collection, analysis, and synthesis of results from experimental studies that determine the energy value and environmental safety of using household waste and peat as alternative fuels. The main focus is on an experimental study of the thermal properties of municipal solid waste and peat: moisture content, ash content, and lower heating value. The environmental characteristics of the combustion process of combustible fractions of municipal solid waste and peat are highlighted, specifically the concentrations of pollutants in flue gases. An analysis of the obtained results was conducted, which includes plotting graphical relationships between the heat of combustion of municipal solid waste and peat and their moisture content and ash content. It was found that as the moisture content and ash content of waste and peat increase, their heat of combustion decreases in direct proportion.

Chapter 4 presents the scientific rationale for developing optimal composite mixtures based on combustible fractions of municipal solid waste and peat, with the aim of improving municipal solid waste processing technology. To this end, a mathematical model was developed to determine the optimal parameters of the technological process. The environmental aspects of implementing the developed composite mixtures are

examined, specifically the possibility of using them in the Altep DUO PLUS-type solid-fuel boiler manufactured by Ponory LLC. The choice of household waste processing technology through the development of composite mixtures is justified. Practical recommendations have been formulated regarding the use of composite mixtures in solid-fuel boilers, which include optimal formulations for the composite mixtures, conditions for their effective use, and proposals for reducing the concentrations of carbon (II) oxide, nitrogen (II) oxide, nitrogen (IV) oxide, and sulfur (IV) oxide.

The issue of waste management, particularly in light of the increasing volume of municipal solid waste in Ukraine, has become even more pressing amid the ongoing military conflict. At the same time, challenges arise in small communities, where the infrastructure for effective waste management is lacking, often leading to the formation of unauthorized landfills. Therefore, improving household waste recycling technology by developing composite mixtures based on household waste and peat focuses on addressing energy-related issues while minimizing the impact on the natural environment and reducing the volume of accumulated waste.

This dissertation is a comprehensive scientific study that presents theoretical principles, scientific and methodological approaches, and practical recommendations for improving household waste processing technology through the development of composite mixtures.

The scientific propositions, conclusions, and recommendations presented in this dissertation were independently derived by the author. The author's contribution to co-authored scientific works is specified in the list of publications.

Key words: municipal solid waste, peat, waste management, composite mixtures, Poltava region, ash, moisture content, calorific value, resource potential, sustainable development, environmental safety, infrastructure facilities, energy efficiency, circular economy.

Список публікацій здобувача
Публікації у виданнях, що включені до міжнародних
наукометричних баз Scopus

1. Iliash, O., Holik, Y., Allesch, A., Chepurko, I., & **Serha, T.** (2023). Analysis of studies on the morphological composition of domestic waste in Ukraine. *Environmental Problems*, 8(4), 241–246. <https://doi.org/10.23939/ep2023.04.241> (квартиль Q4).

Особистий внесок здобувача: зібрано й узагальнено дані щодо компонентного складу побутових відходів, характерного для міст України, та проаналізовано вплив якісних показників окремих фракцій відходів на подальший вибір операцій і методів оброблення побутових відходів в рамках системи управління відходами.

2. Iliash, O., **Serha, T.**, Allesch, A., Bredun, V., Chepurko, I., & Maksiuta, N. (2024). Comparative analysis of the study results on the component composition of municipal waste in settlements of township and village type in the Poltava region. *Environmental Problems*, 9(4), 254–261. <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.254> (квартиль Q4).

Особистий внесок здобувача: здійснено порівняльний аналіз зібраних даних морфологічного складу побутових відходів, що утворюються на територіях населених пунктів Полтавської області селищного й сільського типу, та проведених авторами власних досліджень побутових відходів на території селища Котельва Полтавської області.

3. Holik, Y., Krot, O., Chernetska, I., Chepurko, I., & **Serha, T.** (2025). Comprehensive assessment of the energy potential of biomass and municipal wastes in the Poltava region. *AIP Conference Proceedings*, 3238(1), 1–12. <https://doi.org/10.1063/5.0248956> (квартиль Q4).

Особистий внесок здобувача: проведено аналіз морфологічного складу побутових та зелених відходів, а також аналіз енергетичного потенціалу рослинної біомаси та запропоновано як поширений метод управління побутовими

відходами, термічне знешкодження, спрямоване як на вилучення енергії, так і на радикальне скорочення обсягу та ваги відходів.

4. Holik, Y., **Serha, T.** & Kutnyi, B. (2026). Calorific value of household waste and peat from the Poltava region. *Environmental Problems*, 11(1), 61–65. <https://doi.org/10.23939/ep2026.01.061> (квартиль Q4).

Особистий внесок здобувача: на основі власних лабораторних досліджень здійснено аналіз теплотвірної здатності горючих фракцій побутових відходів і торфу та сформовано висновки.

Публікації у наукових фахових виданнях України категорії «Б»

5. Ілляш, О. Е., **Серга, Т. М.**, Бредун, В. І., Чепурко, Ю. В., & Максюта, Н. С. (2024). Порівняльний аналіз методологічних підходів до проведення сортувальних аналізів побутових відходів в Україні та Австрії. *Екологічні науки*, 4(55), 181–186. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.29>.

Особистий внесок здобувача: проведено аналітичний огляд існуючих методологій та здійснено порівняльний аналіз українських методичних рекомендацій з європейськими методологіями, визначено сильні й слабкі сторони української методології, що сприяють або обмежують застосування правил європейської методології в умовах України.

6. Голік, Ю. С., & **Серга, Т. М.** (2024). Ресурсний потенціал побутових відходів. *Екологічні науки*, 6(57), 166–171. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.24>.

Особистий внесок здобувача: проведено оцінювання загального ресурсного потенціалу побутових відходів та прогнозованих об'ємів утворення окремих ресурсоцінних компонентів.

7. **Серга, Т. М.**, & Голік, Ю. С. (2025). Аналіз сучасних практик управління побутовими відходами. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, 2, 403–410. [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).52](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).52).

Особистий внесок здобувача: здійснено збір та систематизовано інформацію щодо існуючих методів управління побутовими відходами.

8. Голік, Ю. С., & Серга, Т. М. (2025). Застосування торфу з родовищ Полтавщини як компоненту композиційного палива на основі горючих фракцій побутових відходів. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*, 4, 19–23. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-2>.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано напрацювання вчених, в яких розкрито питання розроблення технології виготовлення композиційного твердого палива, зокрема з торфом.

9. Серга, Т. М., & Голік, Ю. С. (2026). Вологість та зольність побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини. *Екологічні науки*, 2(65), 339–344. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.2-65.48>.

Особистий внесок здобувача: проведено оцінювання та порівняльний аналіз вологості й зольності побутових відходів і торфу для визначення їх придатності до формування композиційних сумішей.

Публікації у наукових фахових виданнях України категорії «Б» (з інших спеціальностей)

10. Голік, Ю.С., Шарий, Г.І., Крот, О.П., Чепурко, Ю.В., Серга, Т.М. (2023). Дослідження використання альтернативних видів палива на Полтавщині. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук*, 66. 64–69.

Особистий внесок здобувача: полягає у виконанні аналітичних досліджень, узагальненні результатів і формулюванні науково обґрунтованих висновків.

11. Голік, Ю., Ілляш, О., Серга, Т., & Чепурко, Ю. (2024). Сортувальні лінії як елемент управління побутовими відходами на регіональному рівні. *Галузеве машинобудування, будівництво*, 1(62), 63-68. <https://doi.org/10.26906/znp.2024.62.3561>

Особистий внесок здобувача: визначено, що етап сортування (відокремлення) побутових відходів є невід’ємною складовою комплексних рішень

в сфері управління відходами й відповідно є обов'язковим етапом перед подальшим застосуванням технологій оброблення відходів.

Апробація результатів досліджень

Розділи в колективних монографіях:

12. Голік, Ю. С., Крот, О. П., & **Серга, Т. М.** (2022). Тверді побутові відходи як резерв енергетичного потенціалу міста Полтава. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження – 2022* (с. 37–47).

Особистий внесок здобувача: полягає у самостійному виконанні аналізу сучасного стану управління твердими побутовими відходами, узагальненні отриманих результатів і формулюванні науково обґрунтованих висновків.

13. Ілляш, О. Е., Голік, Ю. С., Чепурко, Ю. В., & **Серга, Т. М.** (2023). Аналіз компонентного складу побутових відходів різних міст України. М. С. Мальований (ред.), *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг* (с. 106–119). Київ: Яроченко.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано вплив показників якості окремих фракцій відходів на подальший вибір операцій та методів оброблення побутових відходів у рамках системи управління відходами.

14. Ілляш, О. Е., Чепурко, Ю. В., **Серга, Т. М.**, Бредун, В. І., & Смоляр, Н. О. (2024). Дослідження компонентного складу твердих побутових відходів. О. Е. Ілляш (ред.), *Екологія. Довкілля. Енергозбереження – 2024* (с. 113–138). Полтава.

Особистий внесок здобувача: проведено систематизацію даних щодо морфологічного складу побутових відходів із виділенням прогнозованих причин змін вмісту компонентів побутових відходів в їх загальній масі.

15. Ілляш, О. Е., Бредун, В. І., & **Серга, Т. М.** (2025). Комплексний методологічний підхід щодо визначення морфологічного складу. О. Е. Ілляш (ред.), *Екологія. Довкілля. Енергозбереження – 2025* (с. 113–134). Полтава.

Особистий внесок здобувача: виконано дослідження з визначення морфологічного складу відходів, здійснено їх статистичне оброблення,

обґрунтовано вплив морфологічного складу на основні фізико-хімічні характеристики відходів та можливості їх подальшого використання.

16. Голік, Ю. С., Кутний, Б. А., & Серга, Т. М. (2025). Використання низькосортних видів палива як енергетичного ресурсу побутових відходів. О. Е. Ілляш (ред.), *Екологія. Довкілля. Енергозбереження – 2025* (с. 170–179). Полтава.

Особистий внесок здобувача: проведено аналіз сучасного стану використання низькосортних палив та побутових відходів як альтернативних джерел енергії, визначено їх основні фізико-хімічні характеристики та енергетичний потенціал.

Тези матеріалів конференції:

17. Голік, Ю. С., & Серга, Т. М. (2022). Регіональний підтекст використання твердих побутових відходів у якості енергетичного палива для котельних установок. *Environment Recovery and Reconstruction: War Context 2022* (с. 38–39). Полтава.

Особистий внесок здобувача: обґрунтовано доцільність використання твердих побутових відходів як альтернативного палива на регіональному рівні та розроблено рекомендації щодо їх впровадження в системи теплопостачання.

18. Голік, Ю. С., & Серга, Т. М. (2022). Інсинерація твердих побутових відходів як процес отримання палива. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження»* (с. 67–69). Полтава.

Особистий внесок здобувача: полягає у аналізі наукових джерел та узагальненні підходів до інсинерації відходів.

19. Голік, Ю. С., Ілляш, О. Е., Серга, Т. М., Пасічко, В. С., & Бородавка, В. В. (2022). Використання твердих побутових відходів у якості палива в м. Полтава. *Сучасні рецепції світоглядно-ціннісних орієнтирів Григорія Сковороди* (с. 96–98). Полтава.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано доцільність їх використання як палива, сформульовано висновки щодо перспектив впровадження даного напрямку в системі теплопостачання міста.

20. Голік, Ю. С., Ілляш, О. Е., Монастирський, О. М., Чепурко, Ю. В., & **Серга, Т. М.** (2023). Оцінка енергоресурсного потенціалу територіальних громад Полтавської області як складової енергетичної безпеки. *Scientific Research in the Modern World* (с. 205–215). Toronto.

Особистий внесок здобувача: проведено оцінку енергоресурсного потенціалу територіальних громад Полтавської області з урахуванням наявних місцевих ресурсів, зокрема біомаси, твердих побутових відходів та інших альтернативних джерел енергії.

21. Голік, Ю. С., & **Серга, Т. М.** (2023). Перспектива використання твердих побутових відходів як енергетичного ресурсу в Полтавській області. *Екологічні проблеми сучасності* (с. 58–62). Луцьк.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано можливості їх використання як альтернативного джерела енергії та визначено основні фактори, що впливають на ефективність їх енергетичного використання; сформульовано висновки щодо перспектив впровадження відповідних технологій у регіоні.

22. Голік, Ю. С., Чепурко, Ю. В., & **Серга, Т. М.** (2023). Перспективи використання альтернативних видів палива на території Полтавської області України. *Стратегія якості в промисловості і освіті* (с. 64–68). Варна, Болгарія.

Особистий внесок здобувача: визначено передумови ефективного впровадження, сформульовано висновки щодо перспектив розвитку альтернативної енергетики в регіоні та її ролі у підвищенні енергетичної безпеки.

23. Голік, Ю. С., Ілляш, О. Е., Чепурко, Ю. В., & **Серга, Т. М.** (2023). Етапи організації системи управління побутовими відходами. *Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України* (с. 217–220). Харків.

Особистий внесок здобувача: розглянуто ключові складові системи управління побутовими відходами, визначено послідовність етапів її організації, а також проаналізовано організаційні та технологічні аспекти впровадження.

24. Ілляш, О. Е., **Серга, Т. М.**, Бредун, В. І., & Чепурко, Ю. В. (2023). Дослідження морфологічного складу побутових відходів селища Котельва Полтавського району Полтавської області. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження* (с. 58–60). Полтава.

Особистий внесок здобувача: визначено морфологічний склад побутових відходів, виконано статистичне оброблення даних та узагальнено результати дослідження.

25. Голік, Ю. С., Ілляш, О. Е., Чепурко, Ю. В., & **Серга, Т. М.** (2023). Аналіз морфологічного складу побутових відходів окремих міст України. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження* (с. 143–146). Полтава.

Особистий внесок здобувача: здійснено порівняльний аналіз основних компонентів відходів та досліджено відмінності, зумовлені регіональними особливостями.

26. Голік, Ю. С., Кутний, Б. А., Гузик, Д. В., Чернецька, І. В., Чепурко, Ю. В., **Серга, Т. М.**, Манейло, Є. М., Михайлюк, С. М., & Грікіс, С. А. (2023). Нові лабораторні стенди кафедр теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики й прикладної екології та природокористування. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження* (с. 218–222). Полтава.

Особистий внесок здобувача: розглянуто функціональні можливості лабораторних стендів, визначено їх роль у формуванні практичних навичок здобувачів освіти та проаналізовано ефективність їх застосування у підготовці фахівців відповідних спеціальностей

27. Голік, Ю. С., Кутний, Б. А., **Серга, Т. М.**, & Чепурко, Ю. В. (2024). Підвищення теплотворної здатності побутових відходів як альтернативного виду палива. *76-та наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету* (с. 328–329). Полтава.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано можливості попередньої підготовки побутових відходів та комбінування з іншими компонентами для підвищення теплотворної здатності.

28. **Серга, Т. М.** (2024). Аналіз результатів досліджень компонентного складу побутових відходів для населених пунктів селищного й сільського типу Полтавської області. *Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики* (с. 387–388). Полтава.

29. **Серга, Т. М., & Голік, Ю. С.** (2024). Зв'язок науки та виробництва – шлях вирішення проблематики побутових відходів Полтавського регіону. *Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології* (с. 184–188). Хмельницький.

Особистий внесок здобувача: узагальнено сучасні підходи до впровадження наукових розробок у практику поводження з відходами, проаналізовано можливості їх застосування в умовах Полтавського регіону та визначено основні напрями співпраці науки і виробництва.

30. Ілляш, О. Е., **Серга, Т. М.**, Бредун, В. І., & Чепурко, Ю. В. (2024). Узагальнені результати чотирьох етапів дослідження морфологічного складу побутових відходів селища Котельва Полтавської області. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи* (с. 211–214). Полтава.

Особистий внесок здобувача: узагальнено дані морфологічного складу побутових відходів за результатами чотирьох етапів дослідження, проведено порівняльний аналіз отриманих показників з визначенням мезонних та структурних особливостей.

31. Ілляш, О. Е., **Серга, Т. М.**, Бредун, В. І., & Чепурко, Ю. В. (2024). Визначення ресурсного потенціалу побутових відходів. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження»* (с. 77–80). Полтава.

Особистий внесок здобувача: визначено частку ресурсоцінних компонентів та проаналізовано можливості їх повторного використання і перероблення.

32. Голік, Ю.С., Кутний, Б.А., **Серга, Т.М.**, & Манейло, Є.М. (2024). Шляхи вирішення спалювання побутових відходів композиційно з торфом як елемент підвищення їх теплотворної здатності. *Матеріали V-Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження»* (с. 166–167). Полтава.

Особистий внесок здобувача: досліджено вплив співвідношення компонентів на теплотвірну здатність композиційного палива.

33. Голік, Ю.С., Ілляш, О.Е., & **Серга Т.М.** (2024). Ресурсоцінні компоненти побутових відходів Полтавської області. *Proceedings of the 5th International scientific and practical conference «Scientific research: modern challenges and future prospects»*. (с. 175–180).

Особистий внесок здобувача: виконано оцінку ресурсного та енергетичного потенціалу виділених компонентів, проаналізовано можливості їх залучення до процесів вторинної переробки та енергетичної утилізації.

34. **Серга, Т.М.**, & Чепурко, А.О. (2025). Еколого-енергетичні характеристики побутових відходів і торфу як паливної суміші. *Тези 77-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»* (с. 308–309). Полтава.

Особистий внесок здобувача: полягає у аналізі енергетичних та екологічних властивостей досліджуваних компонентів і їх композицій.

35. Голік, Ю. С., Кутний, Б. А., **Серга, Т. М.**, & Єрмоленко, Д. Д. (2025). Визначення експериментальним шляхом теплоти згорання ресурсоцінних відходів. *Тези 77-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів* (с. 267–268). Полтава.

Особистий внесок здобувача: здійснено відбір зразків горючих фракцій побутових відходів, виконано вимірювання теплоти згорання із використанням відповідного лабораторного обладнання, проведено оброблення експериментальних даних та сформульовано висновки щодо енергетичного потенціалу досліджених відходів.

36. **Серга, Т. М.** (2025). Використання горючих фракцій побутових відходів зі сміттєзвалищ як елемент управління відходами. *Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології* (с. 111–113). Київ.

37. **Серга, Т. М.,** Голік, Ю. С. (2025). Експериментальне дослідження вологості та зольності побутових відходів і торфу. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження* (с. 126–128). Полтава.

Особистий внесок здобувача: проведено оцінювання та порівняльний аналіз вологості й зольності побутових відходів і торфу для визначення їх придатності до формування композиційних сумішей.

38. **Серга, Т. М.** (2026). Енергетичний потенціал композиційних сумішей. *Тези 78-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів* (с. 335–336). Полтава.

39. **Серга, Т. М.** (2026). Оптимізація функції енергоефективності за допомогою методу градієнтного підйому. *Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference «International Experience in Scientific Research»* (pp. 304–308). Chicago: VoScience Publisher.

40. **Серга, Т. М.** (2026). Дослідження складу димових газів композиційних сумішей. *Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference «Science and Education: Synergy of Innovation»* (pp. 171–175). Berlin: MDPC Publishing.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРАКТИК УПРАВЛІННЯ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ.....	29
1.1 Аналіз управління побутовими відходами в світі.....	29
1.2 Нормативно-правова база у сфері управління побутовими відходами в країнах ЄС та України.....	35
1.3 Аналіз ситуації щодо управління побутовими відходами в Україні	40
1.4 Аналіз компонентного складу торфу як елементу композиційних сумішей.....	44
1.5 Аналіз застосування побутових відходів і торфу як альтернативного виду палива.....	47
1.6 Обґрунтування завдань дисертаційного дослідження.....	51
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	54
2.1 Методика дослідження морфологічного складу побутових відходів.....	54
2.1.1 Аналіз результатів досліджень морфологічного складу побутових відходів населених пунктів України.....	54
2.1.2 Аналіз результатів досліджень морфологічного складу побутових відходів населених пунктів Полтавської області.....	57
2.2 Визначення ресурсного потенціалу побутових відходів.....	61
2.3 Методика проведення факторного аналізу створення композиційних сумішей з побутових відходів і торфу.....	64
2.4 Методика визначення рівня вологості та зольності побутових відходів і торфу.....	68
2.5 Методика визначення теплотвірної здатності побутових відходів і торфу.....	72
2.6 Принцип вимірювання концентрацій під час спалювання горючих фракцій побутових відходів і торфу.....	74
Висновки до розділу 2.....	75

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ І ТОРФУ ЯК ТВЕРДОГО ПАЛИВА.....	77
3.1 Створення лабораторного стенду для визначення теплотехнічних характеристик твердого палива.....	77
3.2 Експериментальне дослідження вологості та зольності побутових відходів і торфу.....	80
3.3 Експериментальне дослідження теплотвірної здатності побутових відходів та торфу.....	89
3.4 Дослідження рівня концентрацій забруднювальних речовин в димових газах під час спалювання побутових відходів та торфу.....	99
Висновки до розділу 3.....	103
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ СУМІШЕЙ ЯК УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ.....	105
4.1 Енергетичний потенціал композиційних сумішей з горючих фракцій побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини.....	105
4.1.1 Дослідження функції на екстремум.....	116
4.1.2 Оптимізація функції за допомогою методу градієнтного підйому.....	118
4.2 Аналіз кількісно-якісного складу димових газів при спалюванні композиційних сумішей.....	122
4.3 Обґрунтування вибору технології перероблення побутових відходів шляхом розроблення композиційних сумішей.....	127
4.4 Рекомендації щодо використання композиційних сумішей в теплогенеруючих установках малої потужності.....	133
Висновки до розділу 4.....	135
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	137
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	139
ДОДАТКИ.....	159

ВСТУП

Актуальність теми. Постійне зростання обсягів утворення відходів на території України, зокрема Полтавської області, та переважно застосування технологій їх видалення, призводить до подальшого збільшення кількості сміттєзвалищ, що у свою чергу викликає засмічення значних площ земель та збільшення емісій забруднювачів у різні компоненти довкілля. Водночас, в результаті видалення побутових відходів на сміттєзвалища, втрачаються значні обсяги ресурсоцінних матеріалів, які можуть служити вторинною сировиною та замінювати традиційні невідновлювані природні ресурси.

Реалії сьогодення вимагають пошуку альтернативних варіантів тепло- та енергопостачання, нових видів палива, більш ефективних та автономних, для розвитку децентралізованих систем малої комунальної енергетики. Поряд з цим, залишаються задачі, які окреслені концепцією збалансованого розвитку: зниження викидів парникових газів, зменшення використання викопних невідновлюваних видів палива, зниження маси побутових відходів та площ, зайнятих полігонами й звалищами, рециклінг відходів.

Відповідно до закону України «Про управління відходами» від 20 червня 2022 року №2320-IX, окреслені наступні принципи управління відходами: запобігання утворенню відходів; підготовка відходів до повторного використання; рециклінг; відновлення відходів (у тому числі для виробництва енергії); видалення відходів. Частка відходів, які в даний час сортуються, дуже мала, оскільки сортуються лише окремі компоненти: папір й картон, окремі види пластикових пляшок, скло та метали.

У контексті реалізації положень Національної стратегії управління відходами, європейських екологічних директив та переходу до засад циркулярної економіки особливої актуальності набуває пошук ефективних технологій перероблення побутових відходів, спрямованих не лише на зменшення обсягів їх накопичення та захоронення, а й на максимальне залучення ресурсного та енергетичного потенціалу відходів до повторного використання.

Одним із напрямів вирішення зазначеної проблеми, яка розглядається в даній роботі, є створення композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів та місцевих природних або вторинних ресурсів, зокрема торфу. Водночас існуючі технології перероблення побутових відходів потребують удосконалення з урахуванням морфологічного складу відходів, вимог енергоефективності, екологічної безпеки та можливості практичного використання отриманих композиційних сумішей у теплогенеруючих установках малої потужності. Недостатня дослідженість закономірностей впливу компонентного складу сумішей на їх теплотворні та екологічні показники зумовлює необхідність проведення комплексних наукових досліджень у цьому напрямі.

Таким чином, удосконалення технології перероблення побутових відходів із розробленням композиційних сумішей є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню рівня ресурсоефективності, зменшенню екологічних ризиків, забезпеченню енергетичної безпеки та впровадженню принципів сталого розвитку і циркулярної економіки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано з урахуванням вимог Закону України «Про управління відходами» від 20 червня 2022 року №2320-IX, Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року, відповідно до «Стратегії розвитку Полтавської області на 2021-2027 роки», «Регіональної програми охорони довкілля, раціонального використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки з урахуванням регіональних пріоритетів Полтавської області на 2022-2027 роки («Довкілля – 2027»)) та «Комплексної програми енергоефективності Полтавської області «ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ – 2030».

В основу роботи покладено також результати науково-дослідної роботи кафедри прикладної екології та природокористування Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» на тему «Дослідження складу твердих побутових відходів та їх ресурсного потенціалу» (номер державної реєстрації НДР: 0123U103340).

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є удосконалення технології перероблення побутових відходів шляхом розроблення композиційних сумішей на основі їх горючих фракцій і торфу для підвищення енергоефективності та ресурсозбереження.

Для досягнення мети поставлено наступні завдання:

- здійснити аналіз сучасних практик управління побутовими відходами;
- визначити морфологічний склад побутових відходів громад селищно-сільського типу Полтавської області та їх ресурсний потенціал;
- дослідити показники вологості, зольності та теплотвірної здатності горючих фракцій побутових відходів і торфу;
- побудувати математичну модель створення раціональних композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів і торфу;
- оцінити екологічні аспекти процесу спалювання раціональних композиційних сумішей в теплогенеруючій установці малої потужності;
- розробити рекомендації щодо використання удосконаленої технології перероблення композиційних сумішей для їх спалювання в теплогенеруючих установках малої потужності.

Об'єктом дослідження є процес перероблення побутових відходів та одержання композиційних сумішей.

Предметом дослідження є закономірності формування складу, структури та властивостей композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів і торфу.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та вирішення завдань дисертаційної роботи використано комплекс взаємопов'язаних теоретичних, експериментальних, математичних та статистичних методів дослідження.

Теоретичні дослідження виконувалися із застосуванням методів системного аналізу, узагальнення, порівняння та наукової абстракції для оцінювання сучасного стану проблеми управління та перероблення побутових відходів, аналізу існуючих технологій поводження з ними, визначення перспективних

напрямів ресурсного та енергетичного використання відходів, а також обґрунтування складу композиційних сумішей.

Для визначення морфологічного складу побутових відходів застосовано методи натурних досліджень та сортувального аналізу відповідно до українських методичних рекомендацій та міжнародних методичних підходів, що дало змогу встановити компонентний склад відходів і визначити фракції, придатні для подальшого використання у складі паливних композицій.

Експериментальні дослідження визначення теплотехнічних показників побутових відходів і торфу здійснено з використанням Державних стандартів України. Для оцінювання екологічної безпеки технології використовували інструментальні методи контролю складу димових газів із визначенням концентрацій оксидів вуглецю, оксидів азоту, діоксиду сірки та інших забруднювальних речовин за допомогою газоаналітичного обладнання.

Раціоналізацію складу композиційних сумішей виконували із застосуванням методів математичного планування експерименту та багатофакторного аналізу. Для встановлення закономірностей впливу співвідношення компонентів на теплотехнічні та екологічні показники використовували методи математичного моделювання, регресійного аналізу та побудови математичних моделей.

Обробку результатів експериментальних досліджень здійснювали із застосуванням методів математичної статистики, зокрема визначення середніх значень, стандартних відхилень, перевірки статистичної значущості отриманих результатів та оцінювання адекватності побудованих математичних моделей. При побудові експериментальних залежностей використано пакети програми Microsoft Excel, для створення алгоритмів та математичних моделей, побудові графіків, символічних та чисельних обчислень використано математичне програмне забезпечення Maple.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– вперше на регіональному рівні побудовано математичну модель та визначено раціональні композиційні суміші з горючих фракцій побутових

відходів і торфу на основі проведеного багатofакторного експерименту за критерієм максимальної теплоти згоряння;

– вдосконалено технологію перероблення побутових відходів з обґрунтуванням складу композиційних сумішей для їх спалювання в твердопаливних котлах малої потужності типу Alter DUO PLUS;

– набула подальшого розвитку технологія використання горючих фракцій побутових відходів як альтернативного палива шляхом сумісного спалювання з торфом родовищ Полтавщини, що дозволяє зменшити кількість забруднювальних речовин у димових газах.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні та науковому обґрунтуванні технологічних рішень щодо підвищення ефективності перероблення побутових відходів шляхом їх залучення до енергетичного використання у складі композиційних паливних сумішей.

Дисертаційні дослідження виконані як складова науково-дослідної роботи кафедри прикладної екології та природокористування Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» в межах білатерального міжнародного наукового співробітництва з Республікою Австрія за темою «Дослідження складу твердих побутових відходів та їх ресурсного потенціалу» (номер державної реєстрації НДР: 0123U103340). Отримані результати сприяють розвитку міжнародної співпраці у сфері управління відходами, гармонізації підходів до оцінювання морфологічного складу побутових відходів відповідно до європейських практик, а також формуванню науково-методичних засад ресурсоефективного використання вторинних матеріальних та енергетичних ресурсів.

За результатами проведених досліджень запропоновано до впровадження удосконалену технологію перероблення побутових відходів, яка передбачає виготовлення композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів у поєднанні з торфом. Запропонована технологія рекомендована для використання у фермерському господарстві ТОВ «Понори» Прилуцького району

Чернігівської області як альтернативне джерело енергії для твердопаливного котла типу Alter DUO PLUS.

Результати дисертаційного дослідження також впроваджено у навчальний процес Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» під час викладання дисципліни «Управління відходами» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності G2 «Технології захисту навколишнього середовища». Впровадження результатів дослідження у освітній процес сприяє формуванню у здобувачів сучасних компетентностей у сфері сталого управління відходами, оцінювання ресурсного потенціалу побутових відходів, розроблення альтернативних видів палива та впровадження принципів циркулярної економіки у практику природоохоронної діяльності.

Відповідні акти впровадження наведені у додатку А.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок автора полягає у проведенні аналізу літературних та інформаційних джерел за тематикою дисертації, дослідженні морфологічного складу побутових відходів громад селищно-сільського типу Полтавської області, на прикладі селища Котельва, визначенні ресурсного потенціалу побутових відходів, обробленні та систематизації отриманих експериментальних результатів і побудова математичної моделі. Постановка основних завдань, обґрунтування мети та окреслення наукової новизни отриманих результатів, планування досліджень, здійснено під керівництвом кандидата технічних наук, доцента Голіка Ю.С. Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень, представлених у дисертаційній роботі, наведено у наукових працях, поданих у списку робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень неодноразово доповідалися та обговорювалися на 29 наукових конференціях, а саме:

➤ Міжнародній науково-практичній конференції «Environment recovery and reconstruction: war context 2022» (м. Полтава, 17-18 листопада 2022 р.);

- III Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження» (м. Полтава, 1-2 грудня 2022 р.);
- Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні рецепції світоглядно-ціннісних орієнтирів Григорія Сковороди» (м. Полтава, 02 грудня 2022 р.);
- I Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічні проблеми сучасності» (м. Луцьк, 10 травня 2023 р.);
- 75-й науково-практичній конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів (м. Полтава, 12 травня 2023 р.);
- III International Scientific and Practical Conference «SCIENTIFIC RESEARCH IN THE MODERN WORLD» (Toronto, Canada 12-14 January 2023);
- XVII Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті» (м. Варна, Болгарія, 5–8 червня 2023 р.);
- I Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми теплоелектроенергетики та захист довкілля» (м. Полтава, 21-22 вересня 2023 р.);
- Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України» (м. Харків, 2-3 листопада 2023 р.);
- Національному форумі «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології» (м. Івано-Франківськ, 21-23 листопада 2023 р.);
- IV Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження» (м. Полтава, 7-8 грудня 2023 р.);
- XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи» (м. Полтава, 12-13 грудня 2023 р.);
- 76-й науково-практичній конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів (м. Полтава, 14-23 травня 2024 р.);
- Міжнародній конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії» (м. Харків, 11-12 березня 2024 р.);

- Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики» (м. Полтава, 6 листопада 2024 р.);
- Національному форумі «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології», (м. Хмельницький, 28-29 листопада 2024 р.);
- XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи» (м. Полтава, 12-13 грудня 2024 р.);
- V Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження» (м. Полтава, 19-20 грудня 2024 р.);
- 5th International scientific and practical conference «Scientific research: modern challenges and future prospects» (Munich, Germany, 2024);
- 77-й науково-практичній конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів (м. Полтава, 21 травня 2025 р.);
- Національному форумі «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології» (м. Київ, 27-28 листопада 2025 р.);
- XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи» (м. Полтава, 12 грудня 2025 р.);
- VI Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження» (м. Полтава, 17 грудня 2025 р.);
- Міжнародній науковій конференції «Регіональні проблеми охорони довкілля та збалансованого природокористування» (м. Одеса, 16-17 квітня 2026 р.);
- Фестивалі молодіжної науки – 2026 «Ніч природничо-математичних, біомедичних та аграрно-ветеринарних наук» (м. Київ, 14 травня 2026 р.);
- 78-й науково-практичній конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів (м. Полтава, 20 травня 2026 р.);

- Міжнародній науковій конференції «CONNECT_ED: СТРАТЕГІЧНІ ПАРТНЕРСТВА ДЛЯ ГЛОБАЛЬНОЇ АКАДЕМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ» (м. Суми, 2-5 червня 2026 р.);
- XI Міжнародній науково-практичній конференції «INTERNATIONAL EXPERIENCE IN SCIENTIFIC RESEARCH» (м. Чикаго, США, 11-13 червня 2026 р.);
- XI Міжнародній науково-практичній конференції «SCIENCE AND EDUCATION: SYNERGY OF INNOVATION» (м. Берлін, Німеччина, 15-17 червня 2026 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 40 наукових робіт, у тому числі: 4 статті у періодичних виданнях, внесених до міжнародних наукометричних баз Scopus, 5 статей у наукових фахових виданнях України категорії «Б», 2 статті у наукових фахових виданнях України (з інших спеціальностей), 5 розділів у колективних монографіях, 24 тези доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 229 сторінок, що містить 44 рисунки, 21 таблицю та 7 додатків. Список використаних джерел охоплює 183 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРАКТИК УПРАВЛІННЯ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ

1.1 Аналіз управління побутовими відходами у світі

У світі питання управління побутовими відходами (далі – ПВ) є однією з найактуальніших екологічних та соціально-економічних проблем. Відходи вважаються значним фактором забруднення навколишнього середовища. Великі обсяги накопичених промислових та побутових відходів становлять небезпеку для суспільства та навколишнього середовища (атмосфери, ґрунту, поверхневих та підземних вод тощо), що є складними проблемами сьогодення й потребують невідкладного вирішення.

За Законом України «Про управління відходами» від 20 червня 2022 року №2320-IX [1] побутові відходи – це змішані та/або роздільно зібрані відходи від домогосподарств, включаючи відходи паперу, картону, скла, пластику, деревини, текстилю, металу, упаковки, біовідходи, відходи електричного та електронного обладнання, відходи батарей та акумуляторів, небезпечні відходи у складі побутових, великогабаритні та ремонтні відходи, а також змішані та/або роздільно зібрані відходи з інших джерел, якщо ці відходи подібні за своїм складом до відходів домогосподарств [1].

Теоретичні та практичні аспекти, що присвячені проблемі накопичення, поводження й відновлення та/або перероблення побутових відходів, представлені в працях таких науковців, як О.П. Крот, Т.А. Сафранов, І.Г. Пацева, В.Г. Петрук, В.А. Іщенко, Р.В. Петрук, Л.С. Гапонич, І.Л. Голенко, О.І. Топал, І.В. Корінько, М.П. Горох, В.О. Вороненко, О.В. Харламова, В.М. Шмандій, Л.А. Безденежних, Т.Є. Ригас, М.С. Мальований, S. Vambol [2–19]. На регіональному рівні питанням побутових відходів займаються вітчизняні науковці, які внесли вагоме значення у дослідженні даної проблеми: О.Е. Ілляш, Ю.С. Голік, М.С. Самойлік та інші [20–22].

Зважаючи на швидке зростання населення та урбанізацію, очікується, що річне утворення відходів досягне 3,40 мільярдів тонн до 2050 року [23]. Згідно світових аналітичних звітів щорічно продукується 2,01 млрд. т побутових відходів [24]. Загальний морфологічний склад ПВ, що утворюється в країнах світу, зображено на рис. 1.1.

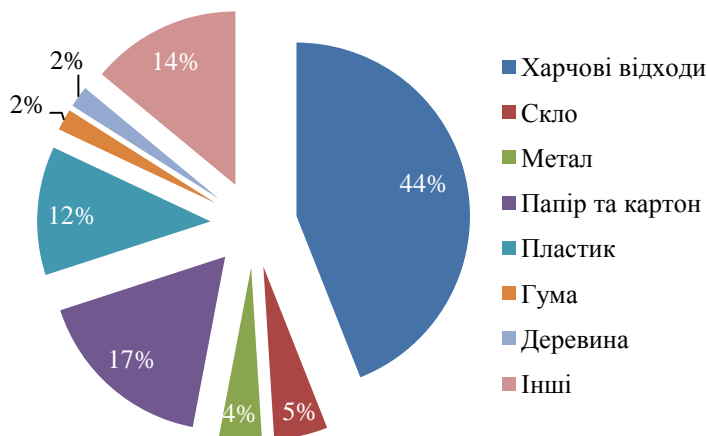


Рис. 1.1 – Морфологічний склад побутових відходів у світі [24]

Джерело: створено автором на основі даних [24].

Діаграма на рис. 1.1 демонструє, що основну частку від загальної маси побутових відходів займають харчові відходи (44%) і фракції, які утворюються у значних обсягах: папір та картон (17%), інші (14%) й пластик (12%). Описана ситуація підкреслює важливість сортування, перероблення та повторного використання ресурсів, що сприятиме зменшенню навантаження на довкілля.

Країни із середнім та високим рівнем доходів забезпечують роздільний збір відходів, а більше третини відходів у країнах з високим рівнем доходів відновлюється шляхом перероблення та компостування. Країни з низьким рівнем доходів збирають близько 48% побутових відходів, з них 26% – у сільській місцевості, і лише 4% переробляються [25–26]. Наприклад, країни Європи й Центральної Азії, Південної Азії, Північної Америки та Латинської Америки й Карибського басейну продукують 77% світових відходів, а країни Африки на південь від Сахари, Близького Сходу і Північної Африки та Східної Азії і Тихого океану разом продукують 23% світових відходів (рис. 1.2) [23, 27].

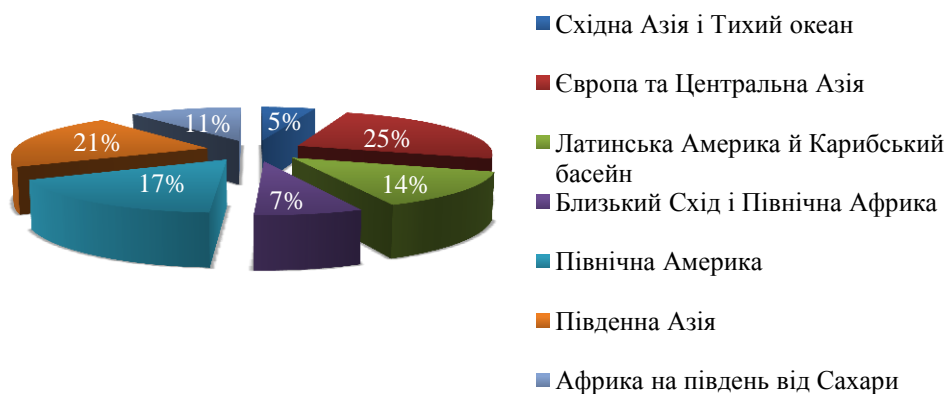


Рис. 1.2 – Частка утворених відходів за регіонами світу

Джерело: створено автором на основі даних [23, 27].

Нерівномірне утворення побутових відходів за регіонами світу пояснюється високою чисельністю населення та низьким економічним статусом, що свідчить про необхідність удосконалення систем управління відходами. Вирішення питання управління побутовими відходами ускладнюється недостатнім розумінням різноманітних факторів, які впливають на всю систему управління ними [28].

За останні півстоліття міжнародне співтовариство почало суворіше ставитися до питання поводження з відходами через відсутність земельних площ для розташування сміттєзвалищ та полігонів, посилюючи вимоги до законодавства. Саме тоді було вперше зафіксовано можливість отримати енергію від процесу спалювання. Так, у 1965 році Конгрес США [29] прийняв перший у світі Закон «Про утилізацію твердих побутових відходів». Поступово на законодавчому рівні цим питанням почали займатися всі провідні країни.

У Сингапурі, у зв'язку з нестачею територій землі, влада не може виділяти великі площі для сміттєзвалищ та полігонів, тому в країні почали будувати енергоблоки на відходах. Сьогодні там спалюють понад 8 тис. тонн сміття на добу, що зменшує його обсяг на 90% [30], а негорючі матеріали, наприклад, метал, скло тощо, продаються. Завдяки «Waste Energy» Сингапур виробляє 2500 МВт-год електроенергії на добу [30].

Південна Корея, а саме місто Сонгдо є одним із яскравих прикладів «розумного міста» або навіть «міста майбутнього», що впроваджує нові технології [30]: замість сміттевозів за транспортування побутових відходів відповідає підземна система. Спеціальний вентиляційний отвір збирає відходи з квартир, які направляються підземною трубою на сортувальний механізм, після чого поставляються на завод, який виробляє з них газ.

Індія відома складною ситуацією продукування полімерів. Так, індійський професор хімії розробив технологію використання пластику [30]. Поліетиленові пакети, обгортки з-під шоколаду, упаковки з-під печива є елементом сировини, яку використовують для будівництва доріг, замінюючи бітум [30].

Розподіл способів поводження з побутовими відходами у різних країнах світу наведено на рис. 1.3.

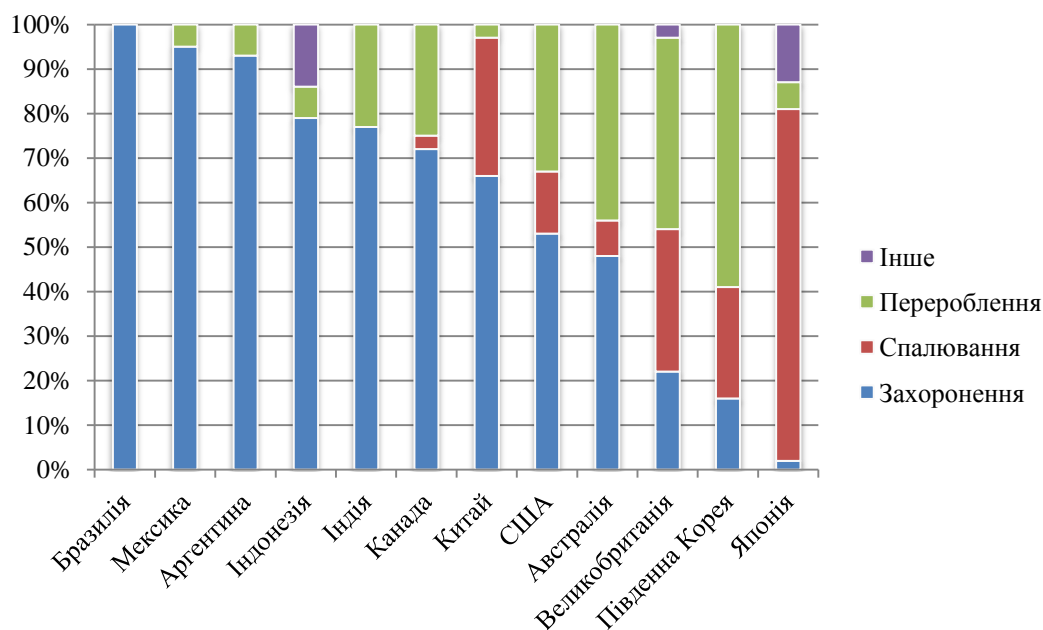


Рис. 1.3 – Способи поводження з відходами різних країн світу

Джерело: створено автором на основі даних [27].

З рис. 1.3 видно, що у таких країнах, як Бразилія, Мексика, Аргентина, Індонезія та Індія, переважає захоронення відходів: майже весь обсяг утворених відходів потрапляє на полігони. Рівень перероблення низький. У Канаді, Китаї та США спостерігається більш збалансований підхід: окрім захоронення, активно

застосовуються спалювання та перероблення. Австралія, Великобританія та Південна Корея демонструють високий рівень перероблення відходів та меншу залежність від полігонів. Найефективнішою виглядає система в Японії, де основна частина відходів піддається термічній обробці [31], а захоронення займає мінімальну частку. Це пов'язано з дефіцитом земель для полігонів та розвитком сучасних сміттєспалювальних технологій.

Найбільш значних успіхів у сфері управління відходами досягли країни Європейського Союзу (далі – ЄС), де роздільне збирання побутових відходів, рециклінг та їх енергетичне відновлення сприяють зменшенню кількості відходів, що розміщені на полігонах [32]. Багато в чому це досягається завдяки особливим нормативним вимогам, встановленим на державному рівні.

Розвинені Європейські країни такі як Швеція переробляють 99% відходів, Німеччина, Бельгія, Австрія, Нідерланди – перероблення досягає 98,6% і лише у Словенії та Латвії частка оброблених відходів є меншою за 90% [33–34].

Найбільш прогресивною країною світу щодо управління побутовими відходами вважається Швеція, оскільки дана країна є одним із лідерів щодо перероблення відходів у Європі [35, 36]. Заслуговує уваги Екологічний кодекс, згідно з яким всі законопроекти, що подаються до шведського парламенту, ретельно перевіряються на предмет можливої шкоди навколишньому середовищу [37].

До світових лідерів з перероблення відходів також відносять і Німеччину. Нова національна система «Duales System Deutschland GmbH» [36], прийнята в 1991 році, дозволила німцям запровадити новий спосіб управління відходами. Система була настільки успішною, що лише в Берліні майже 90% домогосподарств залучені до процесу сортування відходів [35].

У сучасних умовах в Німеччині 68% відходів переробляється або спалюється для виробництва електроенергії, а решта відправляється на звалища. Майже 15% усієї сировини, яка використовується промисловістю Німеччини, отримують шляхом перероблення відходів [35, 36]. До прикладу, країни такі як Німеччина, Японія, Швеція, мають досвід впровадження циркулярної

економіки, яка підвищує рівень перероблення та мінімізує обсяги відходів, що потрапляють на полігони [38].

У Швейцарії у 1980-1990 рр. відбулися значні зміни в галузі охорони навколишнього середовища: було прийнято Закон про охорону навколишнього середовища (1983 р.), розроблено «Керівництво щодо управління відходами» (1986 р.), Стратегію поводження з відходами (1992 р.). Ці документи окреслюють принципи й цілі, стратегії та комплекси заходів для їх досягнення. Їхня практика поступово змінила й значно покращила ситуацію у сфері управління побутовими відходами в країні. У 2000 році в країні заборонили звалища, тому сьогодні більше половини всього сміття переробляється, а решта спалюється [35].

У 1950-х роках у Фінляндії була створена система прийому скляних пляшок з-під напоїв. На фоні цього у 1979 році запроваджена плата за відходи для покриття комунальних витрат і зменшення утворення відходів. У 1996 році аналогічна система була введена для алюмінієвих банок, у 2008 році – для пластикових пляшок. З 2011 року скляні пляшки віддають на перероблення, а не на повторне використання. У 2015 році показник поставки зазначених видів упаковки для напоїв становив від 89% до 95% [39].

Розподіл способів поводження з побутовими відходами у деяких країнах ЄС наведено на рис. 1.4.

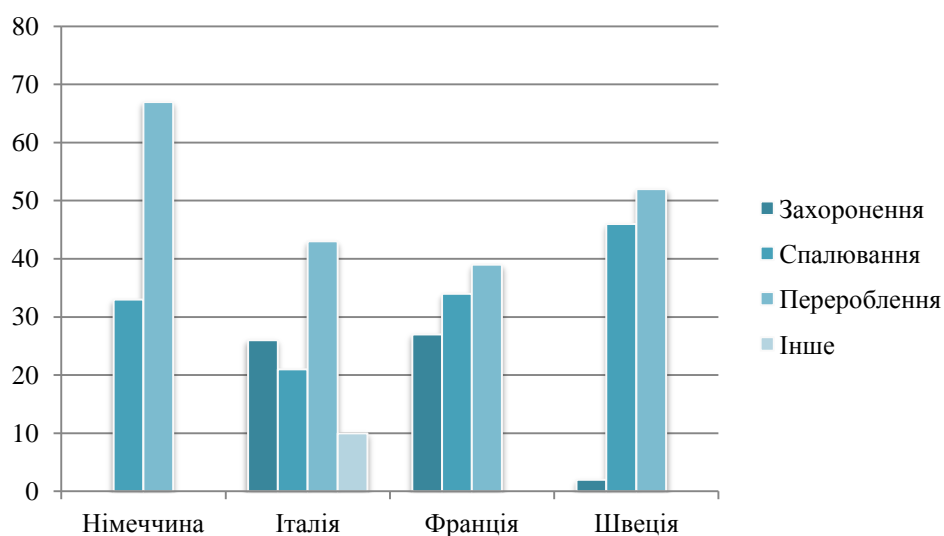


Рис. 1.4 – Способи поводження з відходами у деяких країнах ЄС, % [27]

Джерело: створено автором на основі даних [27].

Аналіз гістограми (рис. 1.4) свідчить, що Німеччина демонструє один із найвищих рівнів перероблення відходів (67%) серед наведених країн. Термічній обробці піддається 33% відходів. Це свідчить про високий рівень розвитку системи сортування та повторного використання ресурсів. В Італії структура поводження з відходами є більш збалансованою. Найбільшу частку займає перероблення (приблизно 43%), однак ще значний відсоток відходів захоронюється (близько 26%). Також використовується спалювання (21%) та інші методи перероблення відходів. Для Франції характерне поєднання всіх основних способів поводження з відходами. Частка перероблення становить 39%, спалювання – 34%, а захоронення – 27%. Це вказує на комплексний підхід до управління відходами. У свою чергу Швеція має найменший рівень захоронення – лише 2%. Основними способами є спалювання (46%) та перероблення (52%). Країна активно використовує сміттєспалювальні заводи з виробництвом енергії, що дозволяє мінімізувати використання полігонів.

Таким чином, країни з розвиненими системами управління відходами демонструють високий рівень ефективності в цій сфері завдяки комплексному підходу: інноваційні технології, активний розвиток циркулярної економіки та екологічно орієнтовані політики. Досвід таких країн, як Німеччина, Японія, Швеція, Нідерланди, Швейцарія, Австрія, Південна Корея, Бельгія, Франція та Сінгапур, слугує зразком у запобіганні накопиченню відходів на полігонах та зменшенні їхнього негативного впливу на довкілля [40].

1.2 Нормативно-правова база у сфері управління побутовими відходами в країнах ЄС та України

Законодавство держав-членів ЄС про навколишнє середовище впливає із політики, викладеної в Плані дій з охорони навколишнього середовища, виданому в 1973 році. Згідно Директиви Європейського Парламенту та Ради 2008/98/ЄС від 19 листопада 2008 року про відходи та скасування деяких директив (далі – Директива 2008/98/ЄС) термін «управління відходами» означає збирання,

транспортування, відновлення (у тому числі сортування) та видалення відходів, включаючи нагляд за такими операціями та післяексплуатаційний догляд за місцями видалення відходів [41].

Директива 2008/98/ЄС [41] зобов'язує країни-члени ЄС розробити й реалізувати плани управління відходами, які повинні відповідати ієрархії управління відходами (рис. 1.5), принципі «забруднювач платить», вимогах відшкодування затрат на видалення відходів їх власником тощо [42].



Рис. 1.5 – П'яти ступенева ієрархія управління відходами

Джерело: [42].

Відповідно до цього підходу [42] найкращим варіантом є дотримання першої ступені ієрархії, тобто найбільше зусиль має бути спрямовано на зменшення кількості відходів та зниження рівня їх небезпеки. Другий напрямок – повторне використання, перероблення або відновлення відходів. І тільки ті відходи, які непридатні для будь-якого використання (навіть для отримання енергії шляхом спалювання), повинні бути захоронені на звалищах або спалені в спеціальних установках [43].

У 1999 році була прийнята Директива Ради 1999/31/ЄС від 26 квітня 1999 року про захоронення відходів із змінами і доповненнями, внесеними Регламентом (ЄС) № 1882/2003 (далі – Директива Ради 1999/31/ЄС) [44], яка встановлює заходи й процедури для запобігання та/або зменшення негативного впливу на навколишнє середовище й зниження ризиків для здоров'я людини, пов'язаних з обробленням відходів. Тобто необхідно вживати заходів щодо

поводження з відходами перед захороненням, перш за все, їх розділення та сепарація небезпечних відходів, а також заходи із виконання контролю над полігонами протягом їх експлуатації, у тому числі після їх закриття.

Директива 2006/21/ЄС Європейського парламенту та Ради «Про управління відходами видобувних підприємств, та якою вносяться зміни до Директиви 2004/35/ЄС» від 15 березня 2006 року [45], встановлює межі для управління відходами, що генеруються видобувними підприємствами, з метою зменшення їхнього впливу на довкілля та здоров'я людей. Документ вимагає від підприємств дотримуватися заходів щодо запобігання утворенню відходів, їхнього зменшення, оброблення та моніторингу. Директива також вносить зміни до Директиви 2004/35/ЄС [46], що стосується відповідальності за екологічні збитки.

Директива Європейського Парламенту та Ради 94/62/ЄС від 20 грудня 1994 року про пакування та відходи пакування (далі – Директива 94/62/ЄС) [47], спрямована на зменшення впливу упаковки та відходів упаковки на довкілля шляхом встановлення норм та цілей щодо запобігання утворенню відходів упаковки, їх повторного використання, вторинної переробки та інших її форм.

Директива Європейського Парламенту та Ради 2012/19/ЄС від 4 липня 2012 року про відходи електричного та електронного обладнання [48], спрямована на захист довкілля та здоров'я людей шляхом запобігання утворенню відходів ВЕЕО та зниженню загального обсягу таких відходів через їх перероблення та повторне використання.

Директива Європейського Парламенту та Ради 2006/66/ЄС від 6 вересня 2006 року про батарейки і акумулятори та відходи батарей і акумуляторів та про скасування Директиви 91/157/ЄЕС [49] введена з метою зменшення їх негативного впливу на довкілля.

Перетворення відходів на ресурси є важливим фактором циркулярної економіки [50, 51]. Цілі та завдання, визначені в європейському законодавстві, є ключовими рушійними силами для покращення системи управління відходами. Відходи однієї галузі, які переробляються та повторно використовуються, і

стають сировиною для іншої галузі, це свідчить про перехід до циркулярної економіки, де відходи використовуються безперервно та ефективно [52].

Інтегровані моделі поводження з відходами наразі широко використовуються у світі. На відміну від традиційного управління відходами, яке здебільшого зосереджується на технологічних питаннях і рішеннях, концепція інтегрованого управління відходами включає три компоненти: екологічну ефективність, соціальне схвалення та економічну доцільність [53].

Для України в [54] вказано, що необхідно вдосконалити законодавство шляхом приведення у відповідність до європейської практики та дотримання ієрархія управління відходами [42]. Як наслідок, спостерігається тенденція значних реформ законодавчої та нормативно-правової бази України щодо відходів, у тому числі в секторі побутових відходів.

Так, у 2017 році затверджено «Національну стратегію управління відходами в Україні до 2030 року» від 08.11.2017 р. № 820-р (далі – Національна Стратегія) [55], яка враховує зміни в системі поводження з відходами: підвищення рівня процесу використання відходів, введення в експлуатацію сміттесортувальних та сміттєпереробних заводів. Велика увага акцентується на технології перероблення вторинної сировини з використанням енергетичного потенціалу та виробництва альтернативного палива з побутових і подібних відходів [55]. Однак, значні масштаби використання ресурсів та застаріла технологічна база визначали й надалі визначають високі показники утворення та накопичення відходів. Головною причиною такої ситуації є відсутність інфраструктури поводження з ними, тоді як наявність такої інфраструктури є невід'ємною ознакою всіх економік розвинутих країн.

Базовим законодавчим актом з 9 липня 2023 року є Закон України «Про управління відходами» №2320-IX від 20.06.2022 року [1], згідно якого запроваджується європейська ієрархія управління відходами [42].

Закон [1] передбачає розробку регіональних планів управління відходами, впровадження принципу розширеної відповідальності виробників, зобов'язання щодо безпечного зберігання та перероблення відходів, а також ведення

відповідної документації. Документ спрямований на зменшення обсягів захоронення відходів та підвищення рівня їх відновлення, відповідаючи європейським стандартам та прагненням України до екологічної безпеки й сталого розвитку. Насьогодні основою законодавства в сфері управління відходами в Україні є такі законодавчі документи (табл. 1.1):

Таблиця 1.1

Основні законодавчі документи у сфері управління відходами в Україні

№ з/п	Законодавчі документи	Пояснення
1	Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 р. № 1264-ХІІ [56]	Документ встановлює правову основу для захисту та збереження природного середовища в Україні. Закон окреслює відповідальність різних рівнів уряду, включаючи Кабінет Міністрів України, Верховну Раду України та місцеві ради, за забезпечення охорони довкілля, розробку та впровадження екологічних програм, встановлення екологічних нормативів і лімітів на використання природних ресурсів, а також за видачу дозволів на операції, пов'язані з відходами. Цей документ є фундаментом для формування державної політики в галузі охорони навколишнього середовища, спрямованої на збереження природних ресурсів для поточних та майбутніх поколінь в Україні.
2	Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 р. № 2059-VIII [57]	Закон встановлює процедуру оцінки впливу планованих діяльностей на довкілля з метою ідентифікації, опису та оцінки потенційного впливу на довкілля та громадське здоров'я. Цей закон є важливим кроком у забезпеченні екологічної безпеки та сталого розвитку країни, сприяючи збалансованому прийняттю рішень щодо реалізації економічних ініціатив з урахуванням їх потенційного впливу на навколишнє середовище.
3	Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку» від 20.03.2018 р. № 2354-VIII [58]	Нормативний документ встановлює основи для проведення оцінки впливу різних планів, програм і стратегій на довкілля на ранніх етапах планування. Цей закон визначає ключові терміни, принципи та процедури, які необхідно дотримуватися при проведенні стратегічної екологічної оцінки. Ці положення сприяють залученню громадськості та забезпечують транспарентність процесу оцінки, а також врахування можливих транскордонних наслідків планованих заходів для довкілля.
4	Національний план управління відходами до 2033 року від 27.12.2024 р. № 1353-р [59]	Документ визначає головні напрями реалізації державної політики у сфері управління відходами, натомість, регіональними та місцевими планами управління відходами визначаються конкретні заходи, необхідні об'єкти інфраструктури, технології, які враховують місцеві умови, економічні розрахунки та спроможність реалізації.

Джерело: створено автором на основі даних [56-59].

Таким чином, прийняття рішень центральними та місцевими органами виконавчої влади, органами місцевого самоврядування тощо щодо стратегічного вибору відповідних пріоритетів в управлінні відходами є ключовим для вирішення питань енергонезалежності держави, економії природних матеріальних та енергетичних ресурсів.

1.3 Аналіз ситуації щодо управління побутовими відходами в Україні

На сучасному етапі, детермінованому зусиллями України в напрямку її інтеграції в європейський глобальний економічний простір, питання соціально-економічної та екологічної рівноваги стає дедалі гострішим, особливо з огляду на поширення моделі сталого розвитку у світі як скоординованої глобальної стратегії виживання людства.

Згідно отриманих даних [60] в населених пунктах України за 2025 рік утворилось понад 49 млн. м³ побутових відходів, або понад 9 млн. тон, які захороняються на 5,6 тис. сміттєзвалищ і полігонів загальною площею понад 8,3 тис. га.

Майже 80% населення України охоплено послугами з управління побутовими відходами. У 2025 році відновлено близько 8,76 % побутових відходів, з них: 0,66% спалено, а 8,1% побутових відходів потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні лінії (в тому числі 0,14% побутових відходів було компостовано). Кількість перевантажених сміттєзвалищ становить 166од. (2,9 %), а 717 од. (12,7 %) не відповідають нормам екологічної безпеки [60].

Через неналежну систему управління побутовими відходами в населених пунктах, як правило у приватному секторі, у звітному році виявлено 11,8 тис. несанкціонованих звалищ, що займають площу 0,5 тис. га, з них ліквідовано у 2025 році 11,4 тис несанкціонованих звалищ площею 0,4 тис. га [60].

На основі даних [61] за період з 2015 по 2024 роки кількість утворених відходів в регіонах України наведено на рис. 1.6.

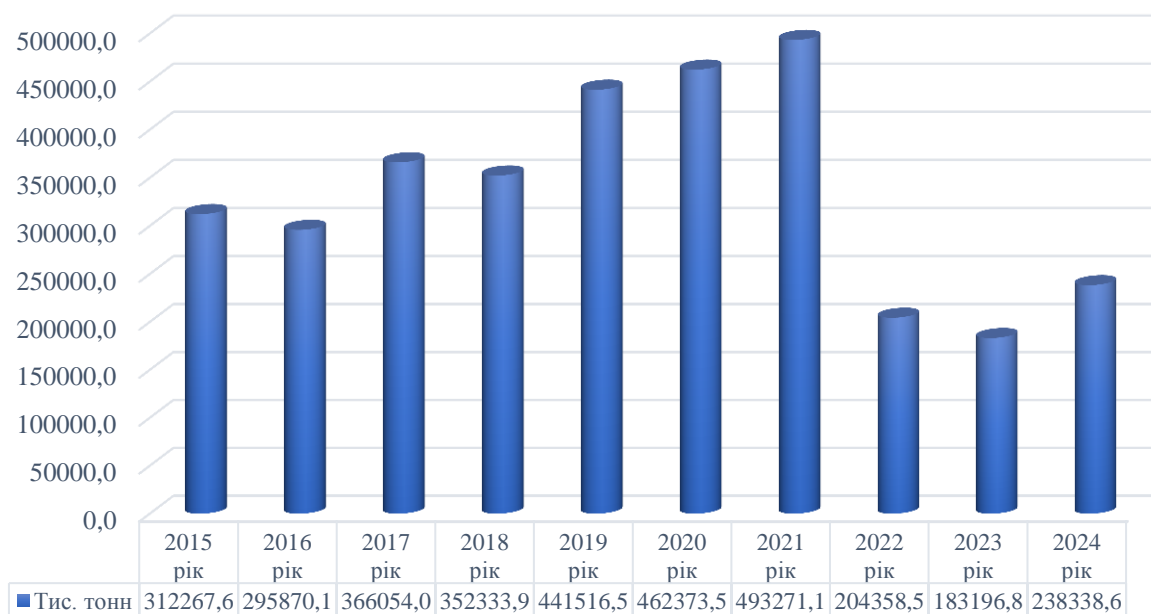


Рис. 1.6 – Утворення відходів в Україні*

Примітка:

* – дані наведено без урахування тимчасово окупованих територій та з урахуванням відходів, що сформовані за місцем реєстрації суб'єктів господарської діяльності.

Джерело: створено автором на основі даних [61].

Аналіз гістограми на рис. 1.6 свідчить, що зростання утворення обсягів відходів пов'язане з розвитком промисловості, збільшенням виробництва та споживання у 2015-2021 роках. Різке зниження утворення обсягів відходів у 2022-2023 роках пояснюється скороченням промислового виробництва, руйнуванням підприємств, тимчасовою окупацією частини територій. У 2024 році помітне зростання показнику, що свідчить про відновлення економічної діяльності підприємств.

Порівняно з країнами ЄС, де значна частина відходів підлягає переробленню, сміттепереробна промисловість України знаходиться на стадії становлення. Відсутність системи перероблення побутових відходів призводить до втрати мільйонів тонн ресурсів потенційних відходів, які щорічно надходять в господарський обіг в Україні. Як наслідок, систему управління відходами в Україні можна охарактеризувати таким чином:

- накопичення відходів, як у промисловості, так і в побуті, що негативно впливає на довкілля та здоров'я населення;
- неналежне оброблення та видалення небезпечних відходів;
- неналежний рівень використання відходів як вторинної сировини через недосконалість основ організації систем управління відходами;
- неефективність економічних інструментів, що застосовуються у сфері управління відходами.

Розвиток роздільного збору та перероблення відходів є важливою частиною оптимізації використання природних ресурсів та переходу до циркулярної економіки [62]. Створення належної системи поводження з побутовими відходами є важливим соціально-екологічним питанням як на державному, так і на місцевому рівнях. Водночас, якщо у великих містах проблема поводження з відходами вирішується завдяки більшим фінансовим та економічним можливостям, більш якісним кадрам, політичній волі тощо, то у малих населених пунктах ситуація значно гірша.

Не винятком залишається і Полтавська область. Однією з найгостріших екологічних проблем в області є питання побутових відходів: їх утворення, накопичення, відсутність належного рівня перероблення [63]. Переважним напрямом поводження з побутовими відходами в Полтавській області є їх видалення на сміттєзвалища та полігони побутових відходів, а також розміщення на несанкціонованих сміттєзвалищах.

Аналіз існуючої системи поводження з відходами у Полтавській області дозволяє оцінити її поточний стан, визначити основні проблеми та перспективи розвитку, а також обґрунтувати необхідність впровадження інноваційних технологій перероблення відходів. Особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на підвищення ресурсоцінності побутових відходів та їх використання як альтернативної сировини для виробництва паливних композицій, що відповідає сучасним принципам сталого розвитку та енергоефективності.

Кількість утворених відходів на території Полтавської області за [61] у 2015-2024 роках наведено на рис. 1.7.

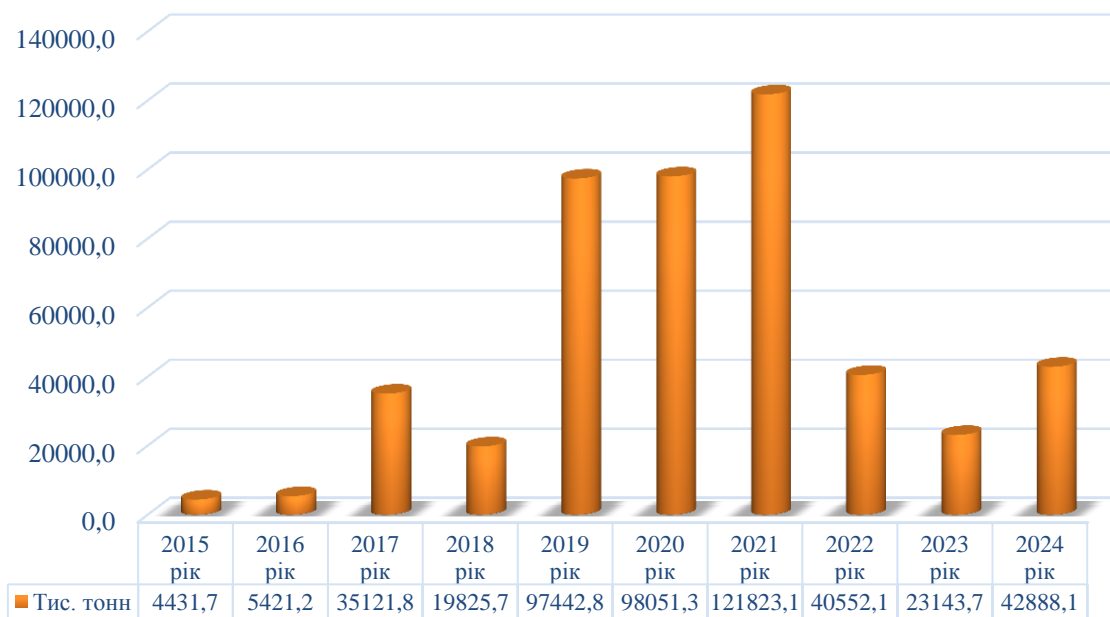


Рис. 1.7 – Утворення відходів на території Полтавської області*

Примітка:

* – дані наведено з урахуванням відходів, що сформовані за місцем реєстрації суб'єктів господарської діяльності.

Джерело: створено автором на основі даних [61].

Аналіз гістограми (рис. 1.7) свідчить про значне зростання утворення відходів за період 2019-2021 років. Це пояснюється збільшенням утворених промислових відходів під час активної роботи підприємств області. Після 2021 року спостерігається різке зменшення обсягів відходів, що пов'язано зі скороченням виробництва, економічною нестабільністю та наслідками воєнних дій в Україні. У 2024 році наявне зростання показнику, що свідчить про певне відновлення економічної діяльності підприємств.

Враховуючи розширення дієвої практики поводження з побутовими відходами у країнах ЄС, для Полтавської області у 2016 році було запропоновано «Субрегіональну стратегію поводження з твердими побутовими відходами для Полтавської області» [64] (далі – Стратегія), яка була розроблена в рамках проекту «Реформа управління на сході України» «Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) Gmbn». Дана Стратегія [64] передбачає використання субрегіональних підходів у сфері управління відходами й має

логічне продовження у «Регіональному плані управління відходами у Полтавській області до 2033 року» (далі – Регіональний план) [65]. Основним завданням Стратегії та Регіонального плану – поетапний розвиток субрегіональної (кластерної) системи управління побутовими відходами, завдяки якій можна ефективно керувати відходами, що утворюються в субрегіоні (кластері), від збору до відновлення ресурсів та безпечного захоронення залишків відходів.

Крім того, питання управління відходами, й у першу чергу, побутовими відходами, визначено на регіональному рівні як один із пріоритетів розвитку Полтавської області до 2027 року в рамках Стратегічної цілі 1 «Ефективне управління просторовим розвитком, забезпечення балансу екосистем та охорона довкілля» одним із поставлених завдань є «Покращення управління відходами» [66].

Таким чином, стан поводження з побутовими відходами в Україні, у тому числі й у Полтавській області, потребує ефективних кроків з планування системи управління відходами на рівні держави, громад та регіонів в цілому. У свою чергу, етапи планування системи управління ПВ потребують проведення ґрунтовних науково-технічних досліджень, серед яких одними із перших є дослідження морфологічного складу побутових відходів в різних населених пунктах за чисельністю населення та соціально-економічною специфікою [54, 55, 63, 65].

1.4 Аналіз компонентного складу торфу як елементу композиційних сумішей

На сьогодні, постало питання сталого розвитку – розвитку, що дає змогу задовольнити потреби населення без шкоди для майбутніх поколінь, що спричинено глобальними змінами клімату, забрудненням навколишнього природного середовища та зменшенням біорізноманіття [67].

Термін «альтернативні джерела енергії» включає в себе відновлювані джерела енергії та вторинні енергетичні ресурси. Відповідно до Закону України

[68] альтернативні види палива – тверде, рідке та газове паливо, яке є альтернативою традиційним видам палива і яке виробляється (видобувається) з нетрадиційних джерел та видів енергетичної сировини. У статті 5¹ даного Закону [68] вказано, що до альтернативних видів твердого палива належать органічна частина промислових та побутових відходів, а також гранули та брикети, вироблені з них і торф, а також гранули та брикети, вироблені з нього.

Торф – органічна порода, що утворилася внаслідок неповного біохімічного розкладу відмерлих рослин в умовах надлишкового зволоження при нестачі кисню. Він містить до 50 % мінеральних компонентів на суху речовин і відноситься до біопалива другого покоління [69, 70].

За офіційними даними [71], геологічні запаси цієї корисної копалини складають 2,04 млрд тонн, а сумарна площа торфових родовищ сягає близько 1 млн га. У найбільших об'ємах видобувають торф у Волинській, Рівненській та Чернігівській областях. Також значні запаси родовищ торфу наявні в Сумській, Житомирській, Львівській, Полтавській, Черкаській, Київській, Хмельницькій та Тернопільській областях (рис. 1.8) [71, 72].

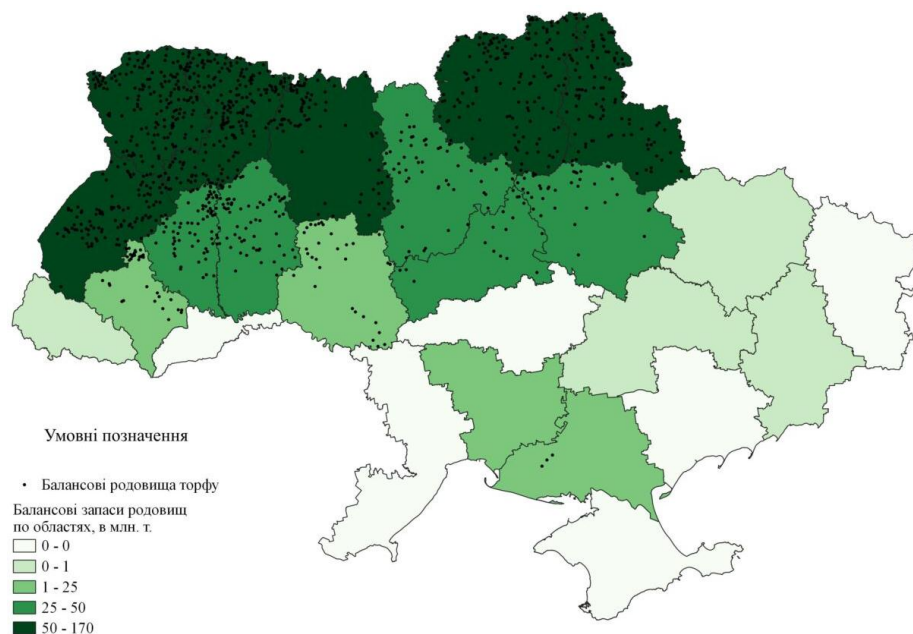


Рис. 1.8 – Балансові запаси родовищ торфу за областями України

Джерело: [71].

Торф широко застосовується в сільському господарстві, для виробництва органічних добрив, стимуляторів росту рослин, ґрунтосумішей, барвників, теплоізоляційних матеріалів, різноманітних сорбентів, торфових поживних брикетів, субстратних торфоблоків [73]. Торф виступає як сировина для виготовлення сорбентів і застосовується при усуненні екологічних катастроф: наприклад, для поглинання нафти [74].

У свою чергу, торфово-болотні системи виконують газорегуляторну функцію: фотосинтез синтезує органічні сполуки з діоксиду карбону та води з використанням світлової енергії й за участю фотосинтетичних пігментів – хлорофілу, та, в основному, з виділенням кисню як побічного продукту [75].

Зокрема, у [76] обґрунтовано, що торфовий потенціал може бути альтернативним джерелом енергії як на регіональному, так і на місцевому рівнях. Це залежить від наявного ресурсу, видобувної та переробної потужності й логістики. Про важливу роль торфового потенціалу у вирішенні соціально-економічних та екологічних проблем регіонів України зазначено в дослідженнях [77, 78].

Полтавська область належить до регіонів України, у яких зосереджено значні запаси низинного торфу, сформованого в умовах річкових долин та заплав із тривалим застійним зволоженням. У структурі родовищ області виокремлюються найбільш перспективні об'єкти: Глобинське, Хорольське, Великокринківське, Яреньківське та інші поклади [71]. Торф низинного типу містить у своєму складі доволі меншу кількість целюлози порівняно з біомасою, оскільки в процесі їх часткового розкладу утворюються лігнін (12–15%) та гумінові речовини, які в свою чергу поділяються на гумінові кислоти (40%) та фульвокислоти (близько 15%). Також у торфі у невеликій кількості присутні бітуми – 4,2–7% [79, 80], які в своєму складі мають основні компоненти: віск, смоли, парафіни.

Лігнін утворюється в процесі торфоутворення і сам бере участь в утворенні гумінових речовин. Спостерігається, що накопичення лігніну відбувається за рахунок підвищення ступеня розкладу торфу [81]. Велика кількість активних

функціональних груп різного типу робить лігнін здатним до численних хімічних перетворень.

1.5 Аналіз застосування побутових відходів і торфу як альтернативного виду палива

Вивчення питання використання побутових відходів як альтернативного виду палива, широко відображене у працях, як іноземних, так й вітчизняних вчених і дослідників.

Дослідження авторів [82] базується на оцінюванні взаємодії рециклінгу й термічного оброблення як елементу управління відходами в Європі. Аналіз показує, що концепція, яка складається з рециклінгу й спалюванні, має перспективи покращення управління відходами, оцінюючи здатність вже існуючих сміттєспалювальних заводів задовольнити потреби ЄС у запропонованій концепції. Однак це зумовило утворення двох основних викликів: необхідність збільшення квот на рециклінг окремих фракцій побутових відходів шляхом роздільного збирання, а отже, вдосконалення певних технологічних ланцюжків перероблення; оптимізація вилучення вторинної сировини з шлаку спалювання, включаючи перероблення чорних і кольорових металів, скла тощо.

У роботі A. Kaur, R. Bharti, R. Sharma [83] вказано, що для відновлення та/або оброблення відходів застосовуються різні методи. Серед них автори виділяють найпоширенішу практику серед країн, які розвиваються, – отримання енергії з відходів: Waste to Energy (WtE) та Energy from Waste (EfW). Автори аналізують екологічні та економічні аспекти різних методів, включаючи термічні процеси, такі як спалювання, піроліз, газифікація тощо. Дослідники, оцінюючи переваги та недоліки кожного методу, також враховують концепцію сталого розвитку.

Науковці у напрацюванні [84] провели оцінку впливу поводження з відходами на навколишнє середовище шляхом порівняльного дослідження викидів CO₂, акцентуючи на рециклінг та спалювання. Вчені стверджують, що

використання відходів як джерела енергії, особливо на цементних заводах і в паперовій промисловості, є ефективною технологією для скорочення викидів CO₂ за рахунок високих температур. Зокрема, на думку науковців, вторинне перероблення матеріалів призводять до менших викидів CO₂, ніж альтернативне постачання первинних матеріалів, що, в свою чергу, значно зменшує кількість накопичених відходів.

У дослідженні [85] представлено аналіз технологій поводження з побутовими відходами через призму оцінки життєвого циклу (далі – ОЖЦ) відходів, з особливою увагою до географічної неоднорідності, технологічного розмаїття та стратегій щодо зменшення викидів. Аналіз підкреслює потребу в методологіях оцінки життєвого циклу відходів, які відображають унікальні характеристики потоків відходів, конфігурацій поводження з ними та соціально-економічних умов. Позитивною стороною даного підходу є узгодження застосування ОЖЦ відходів з практичними обмеженнями, такими як доступність даних і варіації в нормативно-правовій базі. Однак існують регіони, де інфраструктурні обмеження та проблеми управління створюють значні бар'єри для сталого управління відходами.

У праці [86] автори підтверджують, що спільне спалювання природного газу із належним чином підготовленим паливом Refuse Derived Fuel (далі – RDF) та Solid Recovered Fuel (далі – SRF) можна розглядати як один із засобів низьковитратної модернізації та вирішення проблем поводження із побутових відходів на місцях в широко розповсюджених в Україні котлах малої та середньої потужності. Однак використання природного газу зумовлює поступове зниження його природних запасів, виснаження газових родовищ, що свідчить про пошук альтернативних джерел енергії.

У свою чергу Магера Ю.М. [87] за допомогою розрахункової математичної моделі визначає умови, що дозволяють проводити спалювання низькокалорійних побутових відходів без додаткового палива. В результаті отримані рівняння є корисним інструментом для визначення умов роботи топки, за яких є можливість проводити процес спалювання побутових відходів без використання додаткового

палива. Водночас основною проблемою залишається неоднорідність складу відходів, що ускладнює стабільність процесів горіння та контроль викидів в атмосферне повітря. Однак збільшення частки побутових відходів призводить до зростання ризику утворення шлаків, корозії обладнання та накопичення хлоридів і лужних металів у золі.

В основі роботи [88] лежить розроблення новітніх методів та технологій для перетворення побутових відходів на термічну енергію, оптимізуючи склад побутових відходів, комбінуючи їх з екологічно чистими джерелами палива, такими як енергетичні культури і твердопаливні пелети, що не тільки сприятиме зменшенню негативного впливу відходів на довкілля, але й забезпечить отримання відновлюваної енергії. Відповідно, концепція є безумовно актуальною, враховуючи сьогодення, оскільки перетворення відходів на термічну енергію сприяє зменшенню обсягів захоронення на полігонах, скороченню площ забруднених територій та частковому заміщенню традиційних викопних палив. Особливо важливим є поєднання побутових відходів з біомасою, що покращує теплотехнічні характеристики палива і підвищує стабільність процесу горіння. Водночас, твердження щодо «отримання відновлюваної енергії» потребує уточнення, оскільки побутові відходи лише частково містять біогенну складову. Значна частина ПВ включає пластмаси та синтетичні матеріали нафтового походження, тому енергія, отримана під час їх спалювання, не може повністю вважатися відновлюваною. Крім того, термічне перероблення відходів супроводжується утворенням токсичних речовин, що потребує застосування сучасних систем очищення димових газів.

Питанням використання торфу, як компоненту альтернативного виду палива, займається низка провідних українських вчених Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України. Наприклад, робота Корінчука Д.М. [89] присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми зниження витрат енергетичних і матеріальних ресурсів базових стадій технологій виробництва біо- та торфопалива. На основі власних досліджень автор розробив технологію виготовлення з торфу, як зв'язувального елемента, та рослинної і

деревинної біомаси, як наповнювача, композиційного твердого палива з заданими енергетичними та механічними якісними показниками для використання в теплоенергетичних установках, що зумовлює стабільний процес горіння.

Окрему увагу дослідники приділяють торфу як регіональному паливному ресурсу. У роботі [90] встановлено, що зольність і ступінь розкладу, суттєво варіюються залежно від умов формування родовищ, впливаючи на можливості його використання в енергетиці як палива. Водночас, доцільно зауважити, що на енергетичну придатність торфу впливають не лише зольність і ступінь розкладу, але й вологість, вміст сірки, щільність, вихід летких речовин та екологічні характеристики спалювання.

Питання фізико-хімічних властивостей побутових відходів, зокрема їх вологості, зольності, теплотвірної здатності тощо, активно досліджується науковцями, оскільки ці показники визначають ефективність подальшого перероблення та енергетичного використання відходів. Наприклад, у [91] встановлено залежність технологічних параметрів ущільнення від вологості відходів, що підтверджує необхідність її врахування при виборі технологій поводження з ними. Зокрема, напрацювання [92] показують, що вологість і зольність є визначальними характеристиками при формуванні палива з твердих побутових відходів. Вони впливають на теплотвірну здатність, стадії термічного розкладання та ефективність спалювання, що обґрунтовує необхідність їх подальшого детального вивчення.

Отже, аналіз наукових досліджень підтверджує доцільність використання побутових відходів як альтернативного джерела енергії сумісно з торфом, оскільки це дозволяє одночасно вирішувати енергетичні та екологічні проблеми регіону. Разом із тим ефективність створення композиційних сумішей з вище перерахованих компонентів залежить від попередньої підготовки елементів, знаходження оптимального складу композиційних паливних сумішей, контролю процесів горіння та впровадження сучасних систем очищення викидів для їх низькотемпературного спалювання з використанням теплогенеруючих установок малої потужності.

1.6 Обґрунтування завдань дисертаційного дослідження

Проаналізовано стан управління відходами у світі. Більшість розвинених країн світу демонструють високий рівень управління відходами завдяки комплексному підходу, що включають інноваційні технології, активний розвиток циркулярної економіки та екологічно орієнтовані політики, сприяючи запобіганню накопичення відходів на полігонах та зменшенню негативного впливу на довкілля. Країни Європейського союзу здебільшого переробляють відходи, певна частина відходів піддається термічному обробленню і лише незначна частка захороняється.

Встановлено, що законодавство країн Європейського Союзу спрямоване на зменшення кількості побутових відходів, роблячи акцент на п'яти ступеневу ієрархію управління відходами, де останнім методом поводження з відходами є рециклінг. Зокрема, законодавство України розпочало впроваджувати європейський досвід управління відходами. Однак, для України ключовими залишаються питання щодо прийняття рішень центральними та місцевими органами виконавчої влади, органами місцевого самоврядування тощо щодо стратегічного вибору відповідних пріоритетів в управлінні відходами.

Проаналізовано стан поводження з побутовими відходами в Україні та в Полтавській області. Встановлено, кількість утворених відходів на території України за 2024 рік становив 238 338,6 тис. тонн, а на території Полтавської області – 42 888,1 тис. тонн. Це свідчить, що потенційно втрачається значна кількість ресурсоцінних компонентів, які можуть бути введені в господарський обіг, спричинено відсутністю комплексної інфраструктури збору, сортування та перероблення цих відходів.

Здійснено аналіз компонентного складу торфу як елементу композиційних сумішей. Вставлено, що наявність таких компонентів, як гумінові речовини, тобто гумінові кислоти (40%) й фульвокислоти (близько 15%), бітумів (4,2–7%) та лігніну (12–15%) [79, 80] надають торфу зв'язувальних властивостей. Не менш

важливим є хімічний склад торфу, який зумовлює адсорбційну здатність поглинати із газів токсичні речовини.

Проведено аналіз щодо використання побутових відходів як альтернативного виду палива сумісно з торфом, який свідчить про доцільність створення композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів з торфом родовищ Полтавщини, враховуючи регіональні особливості, особливості щодо регулювання процесів горіння та застосування сучасних газоочисних систем.

Враховуючи вищевикладене формулювання, метою роботи є удосконалення технології перероблення побутових відходів шляхом розроблення композиційних сумішей на основі їх горючих фракцій і торфу для підвищення енергоефективності та ресурсозбереження.

Відповідно для досягнення зазначеної мети були сформульовані такі завдання дослідження:

- здійснити аналіз сучасних практик управління побутовими відходами;
- визначити морфологічний склад побутових відходів громад селищно-сільського типу Полтавської області та їх ресурсний потенціал;
- дослідити показники вологості, зольності та теплотвірної здатності горючих фракцій побутових відходів і торфу;
- побудувати математичну модель створення раціональних композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів і торфу;
- оцінити екологічні аспекти процесу спалювання раціональних композиційних сумішей в теплогенеруючій установці малої потужності;
- розробити рекомендації щодо використання удосконаленої технології перероблення композиційних сумішей для їх спалювання в теплогенеруючих установках малої потужності.

Структурно-логічна схема досліджень представлена на рис. 1.9.

Результати аналізу сучасних практик управління побутовими відходами, що наведені у цьому розділі, опубліковані у роботах [93-104].

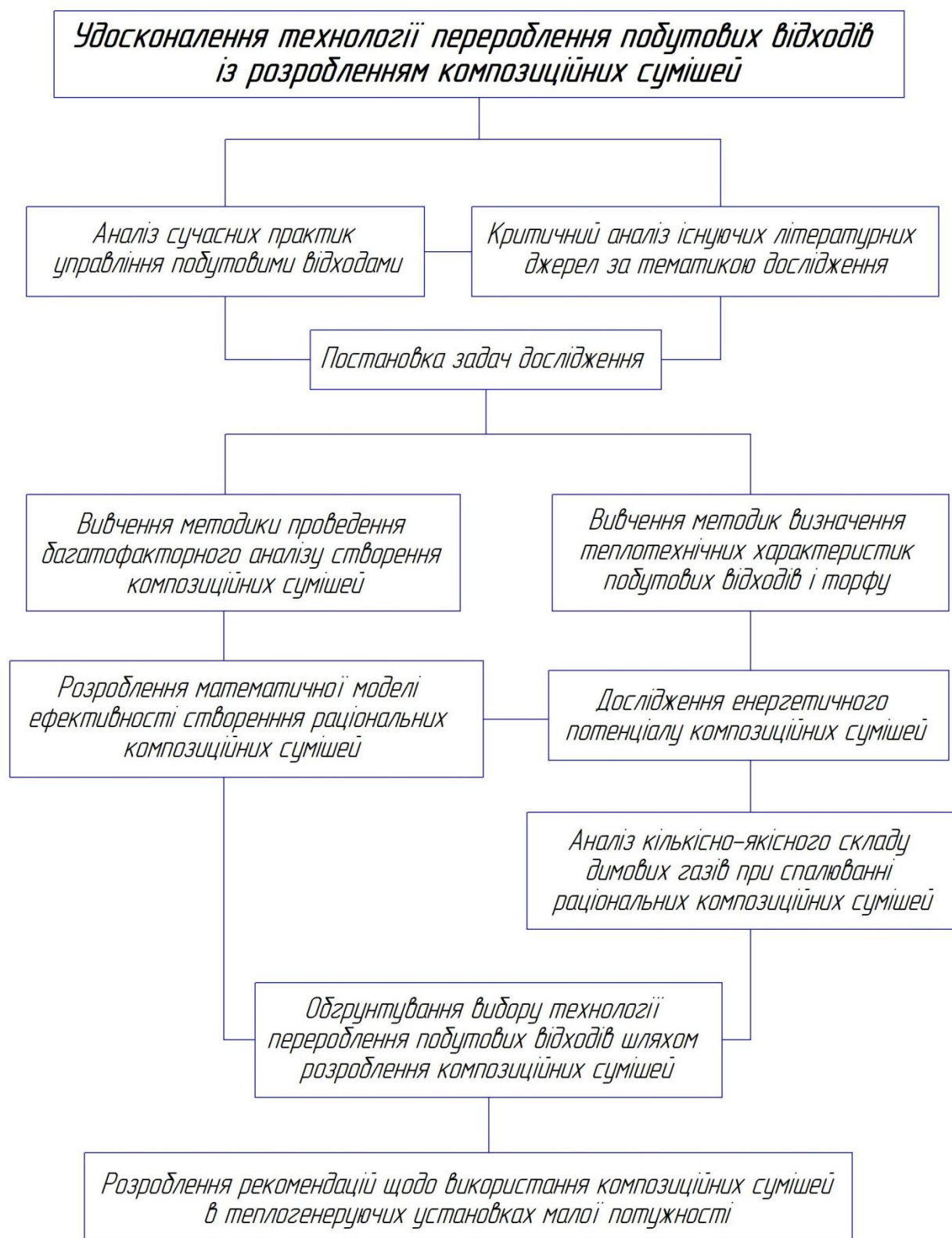


Рис. 1.9 – Структурно-логічна схема дослідження

Джерело: створено автором.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методика дослідження морфологічного складу побутових відходів

Для впровадження європейських стандартів у сферу управління відходами України є дослідження морфологічного складу побутових відходів у населених пунктах. Дані щодо компонентного складу ПВ необхідні для контролю над потоками відходів, що направляються на подальше оброблення та видалення, планування й відведення окремих ділянок для розміщення різних видів відходів на полігонах і санкціонованих звалищах та для вибору найбільш оптимальних технологій оброблення/відновлення побутових відходів [105]. Відповідно, у роботі було здійснено планування процесу дослідження морфологічного складу побутових відходів за етапами, детальна характеристика яких наведена в Додатку Б.

2.1.1. Аналіз результатів досліджень морфологічного складу побутових відходів населених пунктів України

Для визначення відсоткового вмісту компонентів побутових відходів в загальній масі проби певних міст України, було здійснено аналіз морфологічного складу ПВ, що міститься в Регіональних планах управління відходами на період до 2030 року для Полтавської, Вінницької, Чернігівської, Дніпропетровської та Хмельницької областей [106-109].

Дані щодо морфологічного складу побутових відходів для м. Львів приймалися на основі результатів проведених досліджень в рамках проєкту «Дослідження нових впливів на довкілля в умовах епідемії COVID-19 в Україні» [110]. Компонентний склад побутових відходів для м. Житомир приймався на основі проведених досліджень у період 2009-2015 роки [111]. Збір та узагальнення наявних даних здійснювалось з урахуванням положень [112]. Згідно даної

методики, морфологічний склад побутових відходів визначався за 11 компонентами (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Морфологічний склад побутових відходів міст України

Назва компоненту проби	Найменування населеного пункту							Узагальнено по Україні
	м. Вінниця	м. Житомир	м. Чернігів	м. Львів	м. Дніпро	м. Хмельницький	м. Полтава	
Відсоток від загальної маси, %								
Органічні та харчові відходи	41,39	33,33	35,7	65,1	39,36	27,02	49,7	27,02-65,1
Папір і картон	7,2	14,27	8,6	Вторинна сировина 14,2	5,74	2,5/2,53	2,8	2,5-14,27
Полімери (пластик, пластмаси)	9,4	22,99	10,3		8,97	10,35	29,4	9,4-29,4
Скло	9,8	7,44	9,1		8	14,29	6,3	6,3-14,29
Чорні метали	2,1	2,91	1,7		1,01	0,34	1,3	0,34-1,3
Кольорові метали					0,18	0,9	0	0,18-2,91
Текстиль	-	0,34	1,1		4,03	10,19	4,8	0,34-10,19
Дерево	-	-	0,4		2,53	4,86	0	0,4-4,86
Небезпечні відходи	0,66	-	-	-	0,07	1,48	1,2	0,07-1,48
Кістки, шкіра, гума	-	0,47	1,1	-	2,21	-	1,6	0,47-2,21
Залишок побутових відходів після вилучення компонентів	29,49	10,62	Несортований залишок 32,0	Інші відходи	Несортований залишок		2,9	2,9-32,0
					10,75	6,09		
Упаковка комбінована	-	-	-	-	2,44	-	-	-
Вуличний змет, каміння	-	-	-	-	14,72	-	-	-
Зелені відходи	-	7,64	-	-	-	7,84	-	7,64-7,84
Будівельні відходи	-	-	-	-	-	11,66	-	-
Загальна маса проби	100	100	100	100	100	100	100	100

Джерело: створено автором на основі даних [106-111].

З табл. 2.1 для м. Вінниця видно, що органічні та харчові відходи (41,39%) та залишок побутових відходів після вилучення компонентів (29,49%) є найбільшими за обсягами фракціями в загальній пробі відходів. Відповідно фракції вторинної сировини за обсягами утворення в побутових відходах м. Вінниця займають 28,5% від загальної маси, що підтверджує перспективність

подальшого розвитку системи роздільного збирання в місті.

Узагальнені дані [111] показують, що вміст деяких ресурсоцінних компонентів для м. Житомир в разі відрізняються від показників [106]. Варто зазначити, що обсяг залишку побутових відходів після вилучення компонентів відрізняється майже у три рази (м. Вінниця – 29,49%, м. Житомир – 10,62%), що свідчить про ретельність проведення досліджень. Водночас, фракція «небезпечні відходи» відсутня в морфологічному складі побутових відходів, які досліджувались у [111]. Це пояснюється наявністю в місті пунктів приймання небезпечних відходів, що мінімізує їх потрапляння в контейнери.

З аналізу компонентного складу побутових відходів чітко прослідковується схожість кількісного та якісного складу ПВ міст Чернігів [107] та Вінниця [106], за виключенням фракцій «текстиль», «дерево» й «кістки, шкіра, гума».

Аналіз складу побутових відходів м. Львів [110] демонструє:

- об'єднані в одну фракцію вторинні ресурсоцінні компоненти (14,2%), що свідчить про достатньо розвинену систему роздільного збирання побутових відходів у місті;
- значну частку побутових відходів склали органічні та харчові відходи (65,1%), що пояснюється туристичною специфікою міста.

Морфологічний склад ПВ м. Дніпро [108] представлено 13 фракціями. Компоненти «упаковка комбінована», «вуличний змет, каміння» не відокремлювалися із загального обсягу відходів в результатах інших досліджень. Крім того, слід відмітити розділення фракції «метали» на чорні (1,01%) та кольорові (0,18%) як окремі складові.

Аналіз морфологічного складу побутових відходів м. Хмельницький [109] свідчить, що органічні та харчові відходи (27,2%) є найнижчим кількісним показником даної фракції серед інших міст України, які було узагальнено в табл. 2.1. Проаналізовані дані компонентів ПВ для м. Хмельницький свідчать про значні їх відмінності відносно аналогічних показників для інших міст:

- компоненти скло та текстиль мають найвищі показники 14,29% і 10,19%;
- компонент скло взагалі «випереджає» загальний показник вторинної

сировини у м. Львів (14,2%);

- фракція картон і папір (2,5%) навпаки характеризується найнижчим значенням серед компонентів ПВ досліджуваних міст.

Позитивним моментом у аналізі компонентного складу відходів м. Хмельницький є низьке значення показника несортованого залишку, що говорить про високу ретельність при проведенні досліджень. Також в дослідженнях ПВ м. Хмельницький виділено фракцію зелені відходи, що свідчить про налагоджену систему відокремленого збирання й обліку даних відходів.

Аналіз результатів останніх проведених експериментальних досліджень компонентного складу ПВ м. Полтава [110] показує, що полімери становлять майже 30 % від загального обсягу відходів та їх кількісне значення є найвищим серед аналізуючи місті, скло складає тільки 6,3 % і є найнижчим значенням серед аналогічних показників для інших міст України.

Необхідно відзначити, що накопичення відходів у всіх регіонах України характеризується тим, що в найбільш густонаселених і промислово розвинутих регіонах з високим відсотком міського населення, обсяги накопичених відходів значно вищі, ніж у сільській місцевості. Водночас, встановлена закономірність: чим більше сільського населення і приватного сектору, тим більший відсоток органічних і харчових відходів.

Таким чином, важливими зовнішніми факторами, що впливають на склад побутових відходів, є кліматичні умови, рівень життя населення і рівень розвитку ринку вторинної сировини конкретного населеного пункту та, відповідно, від специфіки джерел їх утворення, тобто, на якій конкретній території збираються відходи (міська, сільська місцевість та змішана зона).

2.1.2 Аналіз результатів досліджень морфологічного складу побутових відходів населених пунктів Полтавської області

За останні 10 років у Полтавській області спостерігається тенденція зростання обсягів утворення відходів [61]. На основі цієї проблеми зібрані та

систематизовані наявні дані щодо морфологічного складу побутових відходів для окремих населених пунктів Полтавської області. Здійснена окрема систематизація результатів проведених досліджень для населених пунктів сільської місцевості, селищного та міського типу [113-122] із застосуванням експрес-аналізу, що представлено в Додатку В.

Аналіз морфологічного складу побутових відходів свідчить про значний діапазон коливань практично за усіма компонентами проби. Це пояснюється епізодичним й несистемним проведенням досліджень в даних населених пунктах (в основному це разові дослідження або експрес-аналізи), доступністю лише розрахункових даних для окремих населених пунктів (м. Миргород, м. Лохвиця, смт. Опішня, смт. Семенівка та інші) та проведенням систематизації даних, що були отримані в рамках досліджень, проведених в різні сезони року.

Досвід показує, що все більше зростає в складі побутових відходів кількість паперу та полімерних пакувальних виробів, пластикової упаковки харчових продуктів, в основному поліетилену високого та низького тиску, а також поліетилентерефталату (ПЕТ-пляшка) [123]. Варто зазначити, що здебільшого змінюється склад побутових відходів за сезонами року через збільшення вмісту харчових відходів в літньо-осінній період. Це пов'язано зі збільшенням споживання населенням овочів і фруктів.

У рамках білатерального міжнародного наукового співробітництва з Республікою Австрія виконано науково-дослідну роботу (далі – НДР) за темою «Дослідження складу твердих побутових відходів та їх ресурсного потенціалу» [124], в основу якої було покладено проведення чотирьох натурних досліджень морфологічного складу побутових відходів на території селища Котельва Котелевської громади Полтавського району Полтавської області (про вибір даної громади як об'єкту дослідження морфологічного складу побутових відходів описано в Додатку Б). Сортивальні аналізи здійснювалися із урахуванням методичних рекомендацій України [112, 125] та окремих положень європейських методологій [126, 127]. Використання нормативних документів дало змогу визначити частку ресурсоцінних компонентів за кожним періодом року й на

основі отриманих даних оцінити теплотвірну здатність фракцій побутових відходів та їх загальний очікуваний тепловий потенціал.

Узагальнені результати проведених чотирьох етапів дослідження морфологічного складу ПВ на території Котелевської громади з урахуванням методичних рекомендацій України представлено в табл. 2.2. та з урахуванням окремих положень австрійської методології представлено в табл. 2.3.

Таблиця 2.2

Морфологічний склад побутових відходів за [112, 125]

Назва компоненту проби	1 етап – осінній сезон*	2 етап – зимовий сезон*	3 етап – весняний сезон**	4 етап – літній сезон**	Загальний діапазон
Біовідходи (харчові відходи, овочі, фрукти, відходи садівництва, відходи від зелених насаджень тощо)	34,53	50,406	28,83	62,2	28,83÷62,2
Папір і картон	4,94	3,3	5,46	5,5	3,3÷5,5
Пластик (пластмаси та інші полімери)	12,14	9,9	11,04	5,49	5,49÷12,14
Скло	7,93	3,7	2,13	4,61	2,13÷7,93
Метали (чорні та кольорові)	3,4	1,63	3,82	0,43	0,43÷3,82
Текстиль	3,97	10,6	0,63	6,5	0,63÷10,6
Деревина	0,16	0,02	0	0	0,02÷0,16
Небезпечні відходи (тара від розчинників, фарб, ртутні лампи, прострочені ліки, отрута, хімікати, гербіциди та пестициди, засоби гігієни, памперси тощо)	3,22***	0,727	9,13	6,81	0,727÷9,39
Комбінована упаковка (упаковка, яка може містити в собі різні поєднання, наприклад картон та метали)	0,82***	0	0,67	1,49	0,67÷1,49
Відходи електричного та електронного обладнання (телефони, комп'ютери, телевізори, холодильники, праски, радіопристрої тощо)	0	0	0	0,11	0,11
Відходи батарей та акумуляторів (пальчикові, автомобільні тощо)	0,01****	0	0	0	0,01
Великогабаритні побутові відходи (меблі, матраци тощо)	0	0	0	0	0
Ремонтні побутові відходи (цегла, штукатурка, шпалери тощо)	0	0	13,55	0	13,55
Кістки, шкіра, гума	0,73	4,72	0	0	0,73÷4,72
Залишок побутових відходів (кістки, шкіра, гума (шини, гумові рукавички тощо), каміння, вуличний змет тощо)	28,15	15	24,73	6,89	6,89÷28,15

Примітка:

* – дослідження проводилися з урахуванням положень «Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів», затверджених Наказом Міністерства з питань житлово-комунального господарства України від 16.02.2010 № 39, що були діючими до травня 2024 року [112];

** – дослідження проводилися за новими «Методичними рекомендаціями з визначення морфологічного складу побутових відходів» затверджених Наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 03.05.2024 № 409 [125];

*** – у ході дослідження виявлені компоненти відходів, що не відповідали класифікаційним категоріям морфологічного складу твердих побутових відходів, визначеним [112]: медичні відходи, памперси, фільтр автомобільний, які при аналізі віднесені до компоненту проби «небезпечні відходи», а фольга віднесена до «комбінована упаковка (упаковка, яка може містити в собі різні поєднання, наприклад картон та метали)»;

**** – при дослідженні в осінній період року зафіксовано пальчикову батарейку, яка при аналізі віднесена до проби «відходи батарей та акумуляторів (пальчикові, автомобільні тощо)».

Джерело: створено автором на основі власних сортувальних досліджень.

Таблиця 2.3

Морфологічний склад побутових відходів за [126, 127]*

Назва компоненту проби	2 етап – зимовий сезон	3 етап – весняний сезон	4 етап – літній сезон	Загальний діапазон
Органіка (крім харчових відходів)	0	0	18,1	18,1
Харчові відходи (кухонні відходи)	45,09	23,1	44,1	23,1÷45,09
Харчові відходи, яких можна уникнути	5,32	5,82	1,07	1,07÷5,82
Папір і картон пакувальні та гофрокартон	2,98	2,19	2,47	2,19÷2,98
Папір і картон (друкована продукція, інші паперові матеріали)	0,32	3,27	3,03	0,32÷3,27
Легка пластикова тара ПЕТ (від напоїв)	1,35	3,79	2,88	1,35÷3,79
Легка полімерна упаковка	4,99	4,35	1,97	1,97÷4,99
Інший пластик	1,474	2,13	0,34	0,34÷2,13
Інша упаковка	0,737	1,42	0,72	0,72÷1,42
Скляна тара	3,45	2,13	4,61	2,13÷4,61
Скло інше	0,244	–	–	0,244
Металева тара	1,275	3,82	0,43	0,43÷3,82
Метали непакувальні	0,35	–	–	0,35
Пластмаси інші	1,35	0,02	–	0,02÷1,35
Деревина	0,02	–	–	0,02
Засоби гігієни	8,66	8,88	4,15	4,15÷8,88
Текстиль	10,6	0,63	6,51	0,63÷10,6
Взуття	1,89	17,41	–	1,89÷17,41
Відходи електричного та електронного обладнання	0,217	–	0,11	0,11÷0,217
Акумулятори, в т.ч. батареї	0,023	–	–	0,023
Проблемні речовини (лікарські засоби, фарби, лаки, масляні фільтри, миючі засоби тощо)	0,49	0,26	2,66	0,26÷2,66
Інертні речовини (будівельне сміття)	2,44	13,55	6,65	2,44÷13,55

Інші відходи (шкіра, гума, іграшки та інструменти з різних матеріалів, м'які іграшки, залишки сигарет тощо)	2,83	6,34	0,07	0,07÷6,34
Сортувальний залишок (неможливо ідентифікувати)	3,9	0,97	0,17	0,17÷3,9

Примітка:

* – дослідження на 1-ому етапі (осінній період року) не проводилися.

Джерело: створено автором на основі власних сортувальних досліджень.

Отже, отримані результати під час першого та другого дослідження, проведені згідно [112], свідчать про потребу перегляду та розширення класифікаційних категорії компонентів побутових відходів для отримання більш об'єктивних даних морфологічного складу побутових відходів. Зокрема, третє та четверте дослідження виконано згідно [125], де перелік обов'язкових компонентів є значно ширшим, що дозволяє цілісно охарактеризувати ситуацію.

2.2 Визначення ресурсного потенціалу побутових відходів

Результати проведених досліджень морфологічного складу побутових відходів на території селища Котельва Полтавської області дали можливість виділити частки ресурсоцінних компонентів (табл. 2.4) за кожний період проведених досліджень в році.

Таблиця 2.4

Частка ресурсоцінних компонентів у складі побутових відходів, %

Біовідходи	Папір і картон	Скло	Пластик	Метали	Деревина	Текстиль	Загальна частка ресурсоцінних відходів	Загальна частка втор-сировини*
<i>Осінній сезон</i>								
34,53	4,94	7,93	12,14	3,4	0,16	3,97	67,07	28,41
<i>Зимовий сезон</i>								
50,406	3,3	3,7	9,9	1,63	0,018	10,6	79,554	18,53
<i>Весняний сезон</i>								
28,83	5,46	2,13	10,96	3,82	-	0,63	51,83	22,37
<i>Літній сезон</i>								
62,2	5,5	4,61	5,49	0,43	-	6,5	84,73	16,03

Примітка:

* – до вторинної сировини віднесено папір і картон, скло, пластик, метали.

Джерело: створено автором на основі даних табл. 2.2.

На основі даних табл. 2.4 здійснено оцінювання ресурсного потенціалу побутових відходів, виходячи із досліджуваних об'ємів утворення ресурсоцінних компонентів. Результати оцінювання показали, що:

1) загальна частка побутових відходів, які є ресурсоцінними для можливості подальшого відновлення, складає 51,83 – 84,73%, що осереднено становить 71%;

2) частка побутових відходів, які на сьогодні мають товарну цінність як вторинна сировина (папір і картон, скло, пластик, метали) складають від 16,0% до 28,4% від загального обсягу утворених побутових відходів;

3) частка біовідходів складає від 28,83 до 62,2%.

Аналіз літературних джерел [128, 129] свідчить, що для запобігання зниження якості ресурсоцінних компонентів доцільно відкремлювати органічні фракції із загальної маси побутових відходів шляхом організації роздільного збору за місцем утворення з подальшою передачею в пункти з перероблення органічної сировини.

Ресурсоцінність побутових відходів визначається не лише можливістю рециклінгу, а й енергетичним потенціалом окремих компонентів. Значна частка ПВ містить горючі фракції, які можуть бути використані як альтернативне джерело енергії при правильній технології їх термічного перероблення. У зв'язку з цим постає питання оцінювання теплотвірної здатності як показнику ефективності використання відходів у даному напрямі. Відповідно, у табл. 2.5 наведені результати оцінювання теплотвірної здатності компонентів ПВ, отримані організаціями провідних країн світу [130-132].

Таблиця 2.5

Нижча теплотвірна здатність компонентів побутових відходів

Тип компоненту побутових відходів	Нижча теплотвірна здатність, МДж/кг		
	Defra ¹	WB ²	ISWA ³
Харчові відходи	3,4	1,9	4,0
Папір та картон	10,8	6,4	16,0
Пластик:	-	20,1	35,0
- щільний пластик	26,7	н/д ⁴	н/д
- полімерна плівка	21,2	н/д	н/д
Текстиль та взуття	14,3	11,8	19,0
Несортований залишок горючий	13,9	н/д	н/д

Шкіра та гума	н/д	14,3	н/д
Деревина	н/д	9,3	н/д
Садово-паркове сміття	4,6	н/д	н/д
Підгузки та засоби санітарної гігієни	5,4	н/д	н/д
Дрібний змет	2,5	2,6	н/д
Інше	н/д	н/д	11,0

Примітка:

¹ – Defra – Департамент навколишнього середовища, продовольства і сільського господарства Великобританії;

² – WB – Світовий Банк;

³ – ISWA – Міжнародна асоціація з твердих відходів;

⁴ – показник не досліджувався.

Джерело: створено автором на основі даних [130-132].

Авторським колективом [121] попередньо вивчалось питання щодо оцінювання теплотвірної здатності окремих компонентів побутових відходів з урахуванням їх вологості для населених пунктів Полтавської області різних типів. На основі цих напрацювань, було проведено оцінювання теплотвірної здатності морфологічного складу побутових відходів, що досліджувалися в рамках НДР [124]. Результати оцінювання у вигляді питомих показників наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Оцінювання потенціалу теплотвірної здатності компонентів побутових відходів

№ п/п	Компоненти побутових відходів	Частка компонентів ПВ у загальній масі, %	Орієнтовне значення теплотвірної здатності, МДж/кг [121]	Визначений діапазон теплотвірної здатності компонентів ПВ, МДж/кг
1	Біовідходи	28,83 – 50,41	3,5	1,009 – 1,764
2	Папір і картон	3,3 – 5,5	9,5	0,314 – 0,523
3	Полімери	5,49 – 12,14	25,0	1,373 – 3,035
4	Текстиль	0,63 – 10,6	15,0	0,095 – 1,59
5	Деревина	0,018 – 0,16	14,5	0,0026 – 0,023
Загальний оцінений тепловий потенціал ПВ				2,794 – 6,935

Джерело: створено автором на основі даних табл. 2.2 та [121].

Результати оцінювання свідчать про наявність достатнього ресурсного потенціалу досліджених побутових відходів. Водночас, полімери та текстиль разом з компонентами природного походження (папір і картон, деревина), можуть піддаватися процесу оброблення, враховуючи європейський досвід використання вищезазначених фракцій у вигляді RDF-палива для об'єктів інфраструктури.

2.3 Методика проведення факторного аналізу створення композиційних сумішей з побутових відходів і торфу

Під час виконання [124], здійснено сортувальні аналізи із урахуванням методичних рекомендацій України [112, 125] та окремих положень європейських методологій «Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranaysen» і SWA-Tool [126, 127]. Для подальших розрахунків у дисертаційній роботі за результати морфологічного складу побутових відходів приймалися ті, що виконані згідно української методики [112, 125]. Таким чином, здійснено перерахунок вмісту горючих фракцій побутових відходів у загальній пробі, що дало змогу визначити частку ресурсоцінних компонентів, характерну для кожного сезону року проведених досліджень (табл. 2.7).

Таблиця 2.7

Узагальнені результати досліджень компонентного складу побутових відходів

Сезон року	Відсотковий вміст відходу в загальній масі горючих фракцій, %			
	Папір і картон	Пластик (пластмаси та інші полімери)	Текстиль	Деревина
Осінь	22,42	58,82	8,02	1,5
Зима	13,85	41,57	15,0	1,0
Весна	32,0	64,3	4,0	0,5
Літо	28,97	36,77	11,26	0,5

Джерело: створено автором на основі табл. 2.2.

Для планування експерименту доцільно визначено й використано незалежні фактори, тобто змінні величини, які відповідають впливу зовнішнього середовища на процес. Фактори керовані та однозначні [133, 134]. У нашому випадку, за результатами аналізу факторів, що впливають на ефективність створення композиційних сумішей з побутових відходів і торфу, визначено п'ять незалежних факторів (табл. 2.8).

Таблиця 2.8

Рівні факторів

Рівень	Фактори*				
	x_1 (A)	x_2 (B)	x_3 (C)	x_4 (D)	x_5 (E)
Основний (x_{i0})	22,925	50,535	9,5	1,0	30,0
Інтервал варіювання(Δx_i)	9,075	13,765	5,5	1,0	20,0
Верхній ($x_i=+I$)	32,0	64,3	15,0	1,5	50,0
Нижній ($x_i=-I$)	13,85	36,77	4,0	0,5	10,0

Примітка:

* – x_1 (A) – папір та картон, %, x_2 (B) – пластик, %, x_3 (C) – текстиль, %, x_4 (D) – деревина, %, x_5 (E) – торф, %.

Джерело: створено автором на основі даних табл. 2.7.

Кодування значень факторів x_i проводиться за співвідношенням:

$$x_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (2.1)$$

де Δx_i – інтервал варіювання, значення i -го фактора у кодованому масштабі,

$$\Delta x_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}, \quad (2.2)$$

де x_i – значення i -го фактору у натуральному масштабі на максимальному або мінімальному рівні;

x_{i0} – середнє значення i -го фактору у натуральному масштабі.

Кодовані значення факторів x_i зв'язані з натуральними факторами A, B, C, D, E співвідношеннями:

$$x_1 = \frac{A - \left(\frac{A_{\max} + A_{\min}}{2}\right)}{\left(\frac{A_{\max} - A_{\min}}{2}\right)} = \frac{A - \left(\frac{32,0 + 13,85}{2}\right)}{\left(\frac{32,0 - 13,85}{2}\right)} = \frac{A - 22,925}{9,075},$$

$$x_2 = \frac{B - \left(\frac{B_{\max} + B_{\min}}{2}\right)}{\left(\frac{B_{\max} - B_{\min}}{2}\right)} = \frac{B - \left(\frac{64,3 + 36,77}{2}\right)}{\left(\frac{64,3 - 36,77}{2}\right)} = \frac{B - 50,535}{13,765},$$

$$x_3 = \frac{C - \left(\frac{C_{\max} + C_{\min}}{2}\right)}{\left(\frac{C_{\max} - C_{\min}}{2}\right)} = \frac{C - \left(\frac{15,0 + 4,0}{2}\right)}{\left(\frac{15,0 - 4,0}{2}\right)} = \frac{C - 9,5}{5,5},$$

$$x_4 = \frac{D - \left(\frac{D_{\max} + D_{\min}}{2}\right)}{\left(\frac{D_{\max} - D_{\min}}{2}\right)} = \frac{D - \left(\frac{1,5 + 0,5}{2}\right)}{\left(\frac{1,5 - 0,5}{2}\right)} = \frac{D - 1,0}{0,5},$$

$$x_5 = \frac{E - \left(\frac{E_{\max} + E_{\min}}{2}\right)}{\left(\frac{E_{\max} - E_{\min}}{2}\right)} = \frac{E - \left(\frac{50,0 + 10,0}{2}\right)}{\left(\frac{50,0 - 10,0}{2}\right)} = \frac{E - 30,0}{20,0}.$$

Роботу розпочинали з найпростішої математичної моделі лінійного типу, яку можна побудувати після реалізації дослідів повного факторного експерименту. Далі з урахуванням впливу декількох факторів одночасно (ефект парної взаємодії) перейшли до більш складної моделі. Лінійну модель побудовано таким чином:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + a_5 \cdot x_5, \quad (2.3)$$

де y – ефективність створення композиційної суміші з побутових відходів та торфу (нижча теплота згорання);

a_0 – коефіцієнт пропорційності, що враховує вплив усіх інших факторів;

a_i – коефіцієнт пропорційності при досліджуваному факторі;

x_i – кодове значення досліджуваного фактору.

У роботі використано повний факторний експеримент 2^5 та складено його матрицю (табл. 2.9) для отримання більш повної інформації про досліджувані

залежності. Відповідно з обраним планом виконано 32 досліди з повторенням не менше 3-х разів на кожну точку для достовірності результатів експерименту.

Таблиця 2.9

Матриця планування експерименту

№ досліду	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	+	+	+	+	+
2	-	+	+	+	+
3	+	-	+	+	+
4	-	-	+	+	+
5	+	+	-	+	+
6	-	+	-	+	+
7	+	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+
9	+	+	+	-	+
10	-	+	+	-	+
11	+	-	+	-	+
12	-	-	+	-	+
13	+	+	-	-	+
14	-	+	-	-	+
15	+	-	-	-	+
16	-	-	-	-	+
17	+	+	+	+	-
18	-	+	+	+	-
19	+	-	+	+	-
20	-	-	+	+	-
21	+	+	-	+	-
22	-	+	-	+	-
23	+	-	-	+	-
24	-	-	-	+	-
25	+	+	+	-	-
26	-	+	+	-	-
27	+	-	+	-	-
28	-	-	+	-	-
29	+	+	-	-	-
30	-	+	-	-	-
31	+	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-

Джерело: створено автором на основі [133].

Після проведення експериментальної частини необхідною складовою було оброблення результатів за такою послідовністю:

- 1) розрахунок дисперсії досліду;

- 2) розрахунок коефіцієнтів регресії;
- 3) перевірка статистичної значущості коефіцієнтів;
- 4) перевірка адекватності моделі;
- 5) аналіз моделі.

2.4 Методика визначення рівня вологості та зольності побутових відходів і торфу

У рамках виконання дисертаційної роботи було досліджено рівень вологості таких горючих фракцій побутових відходів як папір і картон, пластик, текстиль, деревина, і торфу родовищ Полтавщини. Перед початком проведення дослідження лабораторні зразки проходили етап підготовки: відбирання зразків (відібрані зразки побутових відходів і торфу повинні бути репрезентативними) та подрібнювали їх до однорідної маси.

Вологість досліджуваних зразків визначено за основним стандартним термостатичним методом [135]. Метод заснований на висушуванні наважки досліджуваних зразків у сушильній шафі (рис. 2.1) при температурі 105-110°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) та обчисленні втрати маси.



Рис. 2.1 – Сушильна шафа

Джерело: фото автора.

Лабораторну пробу досліджуваного зразку, при закритій кришці банки, ретельно перемішували струшуванням. Після цього відкрили банку і з різної глибини з двох-трьох місць відібрали в попередньо зважені стаканчики дві наважки зразку по 10 г ($\pm 0,1$ г) кожна. Шар досліджуваного зразку розрівняли легким струшуванням стаканчику та закрили стаканчик кришкою для подальшого зважування. Зважування проводилося на аналітичних вагах ANG220C фірми AXIS з точністю до 0,0001 г (рис. 2.2).



Рис. 2.2 – Аналітичні ваги ANG220C

Джерело: фото автора.

Зважені стаканчики поставили в попередньо розігріту до температури 105-110 °С сушильну шафу. Одночасно встановлювали не більше шести стаканчиків, відповідно з відкритими кришечками стаканчиків. Тривалість просушування зразків, при заданій температурі, становила 60 хв. Після висушування стаканчики з наважками, закриваючи кришками, вийняли із сушильної шафи, охолодили на повітрі протягом 3 хв, потім охолодили в ексікаторі до кімнатної температури. Тривалість охолодження не перевищувала 20 хв. Після чого досліджувані зразки були зважені. Контрольні просушування здійснювали до моменту, коли різниця між попереднім зважуванням стала менше 0,01 г. Тривалість кожного контрольного просушування становила 30 хв.

Зовнішню вологу, вологу повітряно-сухого палива визначено за формулою:

$$W = \frac{M - M_1}{M} 100\%, \quad (2.4)$$

де M – маса наважки досліджуваного зразка до висушування, г;

M_1 – маса наважки досліджуваного зразка після висушування, г;

Розрахунки ведуть для W_1, W_2 , а далі підраховують середнє значення

$$W_{сер} = \frac{W_1 + W_2}{2}, \quad (2.5)$$

Визначення зольності побутових відходів передбачає вимірювання кількості мінерального залишку після повного згорання кожного досліджуваного зразку. Зольність є важливим показником при оцінці енергетичного потенціалу відходів, як і вологість, оскільки зола не згорає і не дає енергії. Тому у роботі досліджено показник зольності горючих фракцій побутових відходів і торфуг родовищ Полтавщини.

Зольність досліджуваних зразків визначено за допомогою методу озолення у електроді муфельній [136]. Даний метод полягав в тому, що досліджувані зразки прожарювали протягом 1 години – до 800°C , а потім кожні 30 хв виконували контрольні прожарювання.

Послідовність підготовки до проведення дослідження поділено на етапи:

1) прожарювали порожні тиглі при постійній температурі 800°C протягом 30 хв, охолоджували в ексикаторі 15 хв та зважували на аналітичних вагах ANG220C;

2) готували наважки досліджуваних зразків масою $5 \pm 0,1$ г при визначенні золи пластику, деревини, торфуг, масою $3 \pm 0,1$ г – при визначенні паперу й картону та масою $2 \pm 0,1$ г – при визначенні текстилю; після чого легким струшуванням розподіляють її рівним шаром по дну тигеля;

3) тиглі з наважками зважували на аналітичних вагах.

Аналіз зольності кожної аналітичної проби виконували за двома наважками. Другу наважку брали в тій же послідовності, що і першу.

Прожарювання зразків проводилось у електропечі муфельній СНОЛ 1,6.2,5.1./11М1У4,2 (рис. 2.3).



Рис. 2.3 – Електропід муфельна

Джерело: фото автора.

Лабораторні проби досліджувалися при досягнення постійної температури (800°C) та прожарювали в закритій муфельній печі протягом 1 години. Час прожарювання рахують з моменту досягнення необхідної температури в просторі печі. Наприкінці вказаного часу прожарювання тиглі з зольним залишком виймали з муфельної печі, охолоджували в ексікаторі протягом 30 хв та зважували на аналітичних вагах.

Контрольне прожарювання тиглів з зольним залишком здійснювали протягом 30 хв та підраховували зміну маси. Дослідження повторювали доки, поки зміна маси за двома зважуваннями не стала мене $0,01$ г.

Зольність лабораторної проби досліджуваних зразків визначали за формулою, %:

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} 100\% , \quad (2.6)$$

де m_1 , m_2 , m_3 – маса тигля відповідно прожареного (m_1), з наважкою досліджуваного зразку (m_2), із зольним залишком після прожарювання (m_3), г.

Зольність за кожною пробою визначали паралельно за двома наважками. За кінцевий результат приймали середнє арифметичне двох паралельних розрахунків.

2.5 Методика визначення теплотвірної здатності побутових відходів і торфу

Визначення теплотвірної здатності побутових відходів і торфу – це один з основних методів оцінювання їх енергетичних властивостей. Розрізняють вищу теплоту згоряння ($Q_{вр}$), де враховується теплота конденсації водяної пари, та нижчу теплоту згоряння ($Q_{нр}$) – без урахування теплоти конденсації водяної пари. У роботі визначено експериментальним методом питому нижчу теплоту згоряння за допомогою калориметру. Значення даного методу полягає в спалюванні лабораторних зразків досліджуваного альтернативного виду палива, тобто побутових відходів і торфу, у середовищі стисненого кисню в герметично закритому металевому посуді (калориметричній бомбі), що занурений у воду. Знаючи масу води, зміни її температури, температуру навколишнього середовища тощо, можна обчислити теплоту згоряння [137]. Розраховується вища теплота згоряння ($Q_{вр}$) за формулою:

$$Q_{\text{вр}} = \frac{((Q + \Delta Q_i) - qCu)}{m_{\text{табл}}} 10^6, \text{ МДж/кг}, \quad (2.7)$$

де Q – кількість теплоти, що поглинається при нагріванні води та інших (металевих) частин калориметру, Дж;

ΔQ_i – втрати кількості теплоти в навколишнє середовище, Дж;

qCu – кількість теплоти згорання мідного запалу, кДж;

$m_{\text{табл}}$ – маса таблетки досліджуваного зразку, г.

$$\Delta Q_i = A \frac{(\Delta t_0 + (t_{i-1} + t_i))}{2} \Delta Z_i, \text{ Дж}, \quad (2.8)$$

де A – енергетичний еквівалент калориметру;

Δt_0 – початкова різниця температур, °С;

t_i – температура у кінці i -го проміжку часу, °С;

ΔZ_i – тривалість i -го часового проміжку, с.

$$\Delta t_0 = t_{0\text{Бекмана}} - t_{\text{навк}}, \text{ °С}, \quad (2.9)$$

де $t_{0\text{Бекмана}}$ – температура нульового рівня відповідно до ртутного термометра Бекмана, °С;

$t_{\text{навк}}$ – температура навколишнього середовища, °С.

$$qCu = \left(\frac{\Delta H}{M_{\text{Cu}}} \right) m_{\text{дроту}}, \text{ кДж}, \quad (2.10)$$

де ΔH – теплота горіння міді кристалічної, яка дорівнює 162 кДж/моль;

M_{Cu} – молярна маса Cu , яка дорівнює 63,55 г/моль;

$m_{\text{дроту}}$ – маса мідного дроту, яка дорівнює 0,0144 г.

Відповідно нижча теплота згорання ($Q_{\text{нр}}$) розраховується за формулою:

$$Q_{\text{нр}} = \frac{((Q + \Delta Q_i) - q_{\text{Cu}}) - Q_{\text{ВП}} \times 1000}{m_{\text{табл}}} 10^6, \text{ МДж/кг}, \quad (2.11)$$

де Q – кількість теплоти, що поглинається при нагріванні води та інших (металевих) частин калориметру, Дж;

ΔQ_i – втрати кількості теплоти в навколишнє середовище, Дж;

q_{Cu} – кількість теплоти згорання мідного запалу, кДж;

$m_{\text{табл}}$ – маса таблетки досліджуваного зразку, г

$Q_{\text{ВП}}$ – кількість теплоти, яка виділяється при конденсації водяної пари, кДж;

$$Q_{\text{ВП}} = \frac{m_{\text{конд}} \times Q_{\text{конд}}}{1000}, \text{ кДж}, \quad (2.12)$$

де $m_{\text{конд}}$ – маса зконденсованої водяної води, г

$Q_{\text{конд}}$ – теплота конденсації водяної пари, кДж/кг (дорівнює 1891 кДж/кг)

2.6 Принцип вимірювання концентрацій під час спалювання горючих фракцій побутових відходів і торфу

Для застосування енергетичного потенціалу побутових відходів і торфу як альтернативного виду палива доцільно провести дослідження на відповідність екологічним вимогам. Дослідження на відповідність екологічним вимогам проводиться за допомогою приладів, що визначають концентрації забруднювальних речовин у димових газах. У дисертаційній роботі для визначення складу димових газів застосовано газоаналізатор ОКСІ 5М (рис. 2.4).



Рис. 2.4 – Газоаналізатор ОКСІ 5М

Джерело: фото автора.

ОКСІ 5М – це мобільний газовий аналізатор, призначений для вимірювань екологічних та теплотехнічних параметрів. Газоаналізатор ОКСІ 5М використовує оптичний метод вимірювання, де концентрації забруднювачів визначаються на основі рівня поглинання світла спеціалізованими датчиками. Прилад вимірює концентрації чадного газу (CO), оксидів азоту (NO_x) і діоксиду сірки (SO₂) у повітрі та димових газах, а також фіксує температуру продуктів згорання. Вимірювання проводились безпосередньо у димовій трубі в центрі її діаметру за допомогою вимірювального щупу. Контроль та вирішення даного аспекту є ключовим для забезпечення екологічної безпеки процесу термічного перероблення побутових відходів.

Висновки до розділу 2

1. Проведено збір та систематизацію даних щодо морфологічного складу побутових відходів деяких населених пунктів України та Полтавської області різних типів.

2. Здійснено чотири сезонні сортувальні аналізи компонентного складу побутових відходів на території селища Котельва Полтавської області із застосуванням українського та австрійського методологічного підходу.

3. Оцінено ресурсний та теплоенергетичний потенціал побутових відходів на основі результатів натурних досліджень для селища Котелевської громади Полтавської області.

4. Проаналізовано методики визначення вологості, зольності, теплотвірної здатності побутових відходів і торфу як твердого палива та описано принцип вимірювання концентрацій забруднювальних речовин у димових газах при спалюванні.

Результати проведених досліджень опубліковані у роботах [138-152].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ І ТОРФУ ЯК ТВЕРДОГО ПАЛИВА

3.1 Створення лабораторного стенду для визначення теплотехнічних та екологічних характеристик твердого палива

Масштабне руйнування інфраструктурних об'єктів (промислових, енергетичних тощо) під час війни має негативний вплив на соціальний розвиток та прогрес бізнес-сектору [153]. Концепція європейської інтеграції післявоєнного відновлення України передбачає активну відбудову міст на основі сталого розвитку, зокрема, відповідно до Цілі 11 Загальної стратегії сталого розвитку «забезпечення відкритості, безпеки, життєстійкості й екологічної стійкості міст, інших населених пунктів» [154].

У роботі [153] доведено, що масштабне руйнування інфраструктури, включаючи критичну, спричиняє нестабільність у соціально-економічному розвитку, руйнує довкілля та погіршує інвестиційний клімат. Встановлено, що оптимізація стратегії міського розвитку у воєнний час повинна бути спрямована на інтеграцію у глобальні економічні мережі, трансфер новітніх технологій, інтеграцію «зелених» ініціатив та активізацію участі суспільства в міських ініціативах, що стало невід'ємною складовою процесу побудови адаптивного та сталого сучасного міста.

Водночас, в нормативному документі [154] зазначено ще одну перспективну ціль, що відповідає напряму управління відходами – Ціль сталого розвитку 12 – «забезпечення переходу до раціональних моделей споживання і виробництва». Перехід до раціональних моделей споживання і виробництва передбачає використання побутових відходів в господарському обігу як вторинних ресурсів шляхом їх перероблення для створення альтернативного палива, що сприяє зменшенню навантаження на полігони та сміттєзвалища, раціональне

використання природних ресурсів і підвищенню рівня екологічної безпеки. Тобто Ціль 12 передбачає мінімізацію утворення відходів шляхом запобігання, скорочення, перероблення та повторного використання. Використання принципів циркулярної економіки, які мають забезпечити використання продуктів і матеріалів якомога довше, є ключовим для цієї мети.

Для досліджень у сфері перероблення побутових відходів енергоефективність має особливе значення, оскільки передбачає максимальне вилучення енергетичного потенціалу відходів. Сучасний ринок енергоефективності в Україні – це частина загальноприйнятої стратегії енергозбереження та окремого плану дій сталого розвитку. Зокрема, до нього включають досить широкий діапазон заходів, які, в першу чергу, спрямовані на зменшення споживання енергії, а також підвищення енергоефективності з ціллю позитивного економічного та екологічного впливу. Пошук нових методів та аналізу питань енергоефективності в будівельному, промисловому та транспортному секторі залишається актуальним [155].

Розвиток енергетики та зростання обсягів використання твердого палива зумовлюють необхідність підвищення ефективності його використання та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище [138]. Водночас, недостатня вивченість фізико-хімічних характеристик ускладнює оптимізацію режимів спалювання та призводить до підвищених втрат енергії і зростання концентрацій забруднювальних речовин. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні ефективних лабораторних стендів, які дозволяють в контрольованих умовах досліджувати процеси горіння твердого палива, визначати їх теплотехнічні параметри та оцінювати екологічні показники.

У даній роботі метою створення лабораторного стенду є визначення теплотехнічних та екологічних характеристик побутових відходів і торфу, зокрема вологості, зольності, теплотвірної здатності та концентрації шкідливих речовин в димових газах. Для визначення вищезазначених показників розроблено лабораторний стенд, до складу якого входять [156]:

- калориметр для визначення теплотвірної здатності твердого палива (рис. 3.1);



Рис. 3.1 – Калориметр для визначення теплотвірної здатності палива

Джерело: фото автора.

- твердопаливний котел для спалювання альтернативних видів палива з можливістю визначення складу димових газів газоаналізатором типу ОКСІ 5М (рис. 3.2).



Рис. 3.2 – Твердопаливний котел

Джерело: фото автора.

Значення створення стенду полягає у здійсненні детального вивчення теплотехнічних характеристик побутових відходів і торфу, що є важливим для розуміння енергоефективності компонентів відходів, на прикладі конкретного регіону. Не менш важливим є оцінювання екологічної безпеки використання відходів і торфу як палива шляхом дослідження концентрацій забруднювальних речовин в димових газах під час спалювання з метою можливості їх використання як альтернативного джерела енергії. Без проведення таких досліджень неможливо довести доцільність використання побутових відходів і торфу як композиційних сумішей для об'єктів інфраструктури.

Таким чином, лабораторні стенди є важливим інструментом для проведення наукових експериментальних досліджень з розроблення нових паливних композиційних сумішей та удосконалення існуючих технологій термічного перероблення на основі теплогенеруючих установках малої потужності.

3.2 Експериментальне дослідження вологості та зольності побутових відходів і торфу

Відбір проб горючих фракцій побутових відходів для визначення теплотехнічних та екологічних характеристик проводився зі сміттєзвалища селища Котельва Полтавського району Полтавської області (рис. 3.3, а). Метою відбору було отримання зразків, що характеризують склад побутових відходів селищної місцевості, для подальшого лабораторного аналізу дослідження вологості, зольності та теплотвірної здатності (рис. 3.3, б).





а)

б)

Рис. 3.3 – а) сміттєзвалище селища Котельва;

б) зважування дослідних зразків.

Джерело: фото автора.

Відбирання проб здійснювали, зважаючи на неоднорідність відходів та умови їх складування, як складова забезпечення достовірності результатів дослідження. Ділянки відбору визначали таким чином, щоб вони охоплювали різні частини сміттєзвалища зі свіжими та частково ущільненими відходами. Відбір проводили з поверхневого шару глибиною приблизно 100 см. Підготовлені проби поміщали у поліетиленові пакети для запобігання зміни фізико-хімічних властивостей до моменту проведення лабораторних аналізів.

Для дослідження було відібрано та відсортовано зразки таких компонентів, як папір і картон, глянцева папір, пластик: поліпропілен та поліетилен, текстиль синтетичний, дерев'яні вироби й торф (рис. 3.4).



Папір і картон



Папір глянцева



Поліетилен



Поліпропілен



Текстиль синтетичний



Дерев'яні вироби



Торф

Рис. 3.4 – Відібрані проби побутових відходів і торфу

Джерело: фото автора.

Вологість палива впливає на процес спалювання, оскільки висока вологість знижує теплотвірну здатність палива, знижуючи енергетичний потенціал та ускладнює цим процес горіння. Визначення вологості побутових відходів і торфу проводилося термостатичним методом, як описано у п. 2.4 Розділу 2 дисертаційної роботи, на базі лабораторії кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

До прикладу, нижче представлено результати експерименту з визначення вологості одного із досліджуваних зразків у роботі (рис. 3.5).



а

б

Рис. 3.5 – Маса досліджуваного пластику (поліпропілену) до (а) та після (б) висушування

Джерело: фото автора.

Перед проведенням висушування маса зразку становила 10,4247 г (рис. 3.5, а). Після лабораторного аналізу маса зразку зменшилась до 10,1297 г (рис. 3.5, б). Отримані результати вказують на наявність у досліджуваному пластику (поліпропілену) певної кількості вологи, яка були видалена під час висушування. Визначення зміни вологості є ключовим етапом підготовки матеріалу для подальших теплотехнічних та екологічних досліджень, оскільки вологість безпосередньо впливає на вибір подальшого перероблення побутових відходів та управління ними. Для аналізу й оброблення даних дослідження було використано програмне забезпечення Microsoft Excel. Результати експерименту досліджуваних зразків представлено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Усереднені результати визначення вологості твердого палива

Показник	Вид палива							
	Папір і картон ¹	Папір глянцевий	Пластик		Текстиль синтетичний ³	Деревина ⁴		Торф ⁵
			поліпропілен (PP)	поліетилен (LDPE) ²		ясен	сосна	
Вологість, %	11,5	13,2	4,8	6,1	15,5	12,8	11,7	7,3

Примітка:

¹ – папір та картон різного розміру та різної щільності непридатний для сортування як сировина через забрудненість;

² – LDPE – поліетилен високого тиску, низької щільності;

³ – шматки щільної тканини (синтетика);

⁴ – дерев'яні вироби;

⁵ – брикетований низинний торф.

Джерело: створено автором на основі власних експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження табл. 3.1 показують, що такі компоненти як текстиль (15,5%), папір глянцевий (13,2%) й деревина (12,8% й 11,7%) мають найвище значення вологості порівняно з пластиком (4,8 й 6,1%). Це свідчить про своєрідну структуру зразків, що має здатність поглинати вологу. Низький вміст води торфу (7,3%) пояснюється тим, що для дослідження останній використовувався у спресованому вигляді.

Зольність палива – це критичний показник, оскільки доволі висока зольність може вказувати на значну кількість неспалених речовин і, відповідно, на низьку теплоту згорання. Визначення зольності проведено за допомогою методу озолення як описано в п. 2.4 Розділу 2 дисертаційного дослідження, на базі лабораторії кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (рис. 3.6).



Рис. 3.6 – Зразки досліджуваних компонентів для визначення зольності:

а) папір та картон; б) дерев'яні вироби.

Джерело: фото автора.

Для аналізу й оброблення даних дослідження було використано програмне забезпечення Microsoft Excel. Результати досліджень представлено табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Усереднені результати визначення зольності твердого палива

Показник	Вид палива							
	Папір і картон ¹	Папір глянцевий	Пластик		Текстиль синтетичний ³	Деревина ⁴		Торф ⁵
			поліпропілен (PP)	поліетилен (LDPE) ²		ясен	сосна	
Зольність, %	5,1	11,4	0,8	1,1	1,4	2,3	1,2	17,1

Примітка:

¹ – папір та картон різного розміру та різної щільності непридатний для сортування як сировина через забрудненість;

² – LDPE – поліетилен високого тиску, низької щільності;

³ – шматки щільної тканини (синтетика);

⁴ – дерев'яні вироби;

⁵ – брикетований низинний торф.

Джерело: створено автором на основі власних експериментальних досліджень.

Аналізуючи табл. 3.2, можна зробити висновок, що найвище значення зольності має торф, який становить 17,1%. Це вказує на значний вміст неорганічних компонентів у торфі. Наступним за величиною показнику є папір глянцекий (11,4%), який в своєму складі може містити значну кількість негорючих речовин (рис. 3.5).



Рис. 3.5 – Вміст золи після прожарювання торфу (а)
та паперу глянцевого (б)

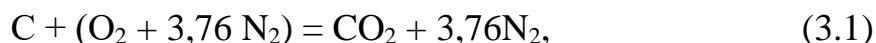
Джерело: фото автора.

Білий або сіро-коричневий колір свідчить, що в золі залишився низький відсоток вуглецю. Чорна зола свідчить про високий відсоток вуглецю, що залишився в золі. Таким чином, визначення зольності у побутових відходах і торфу важливе для розуміння ефективності процесу спалювання та потенційного впливу на довкілля, оскільки високе значення зольності може збільшувати кількість шлаку та золи, що ускладнює управління відходами після їх спалювання.

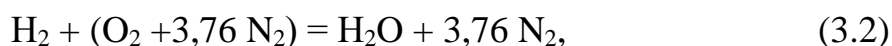
Відповідно, рекомендовано заходи щодо поводження із золою після спалювання на основі проведених раніше досліджень вченими. Наприклад, автори у своїх напрацюваннях [157-159] пропонують додавати золу-винесення з теплоелектростанцій з будівельною метою, а саме: при влаштуванні стінок та покритті шламонакопичувача з ґрунтоцементу. Автори визначили, що зі збільшенням відсоткового вмісту золи, середня міцність на стиск зразків ґрунтоцементу зростає порівняно зі зразками без добавок.

3.3 Експериментальне дослідження теплотвірної здатності побутових відходів і торфу

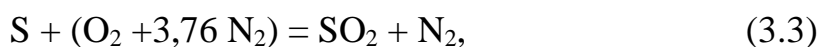
Горючими елементами у паливі є вуглець (С) – основний носій теплоти, водень (Н) – другий найбільш важливий елемент палива та летюча горюча сірка (S) – при згорянні виділяє велику кількість теплоти. Вуглець і водень входять до горючого складу палива у вигляді складних вуглеводневих органічних сполук. При повному згоранні вуглецю утворюється газоподібний діоксид вуглецю (CO₂). Продуктом неповного згорання вуглецю є газоподібний монооксид вуглецю (CO). Дану реакцію можна описати наступним рівнянням:



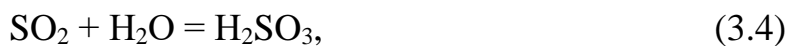
Підвищення вмісту водню у паливі приводить до зростання його загальної теплоти згорання. Пояснюється це тим, що наявність водню у горючій масі підвищує швидкість горіння й реакційну спроможність палива. Продуктом згорання водню є екологічно безпечна водяна пара, тому водень називають екологічно безпечним паливом [160]:



До горючої частини палива, крім вуглецю й водню, відноситься також летуча горюча сірка (S_{лр}). Сірка є горючою речовиною, але вважається небажаною домішкою, бо її наявність призводить до утворення сульфїтного ангїдриду SO₂ у складі палива:



Наявність SO₂ призводить до утворення сірчистої (сульфїтної) кислоти:



Кислота призводить до корозії поверхонь нагрівання та руйнування димових труб. Таким чином, наявність сірки дещо зменшує теплоту згорання висококалорійного палива.

У свою чергу, кисень в горючій масі палива зменшує його теплоту згорання. По-перше, кисень у складі палива знижує частку в ньому горючих речовин: водню та вуглецю. По-друге, кисень, що входить до складу горючої маси, утворює з воднем і вуглецем частково окиснені речовини, що помітно зменшує кількість теплоти, яка виділяється при їх згоранні [160].

У дисертаційній роботі експериментально визначено теплоту згорання побутових відходів і торфу (Q) за допомогою калориметру (рис. 3.1, 3.7). Основна функція калориметру – вимірювання кількості тепла, що виділяється або поглинається під час хімічних реакцій окислення, зокрема при горінні.

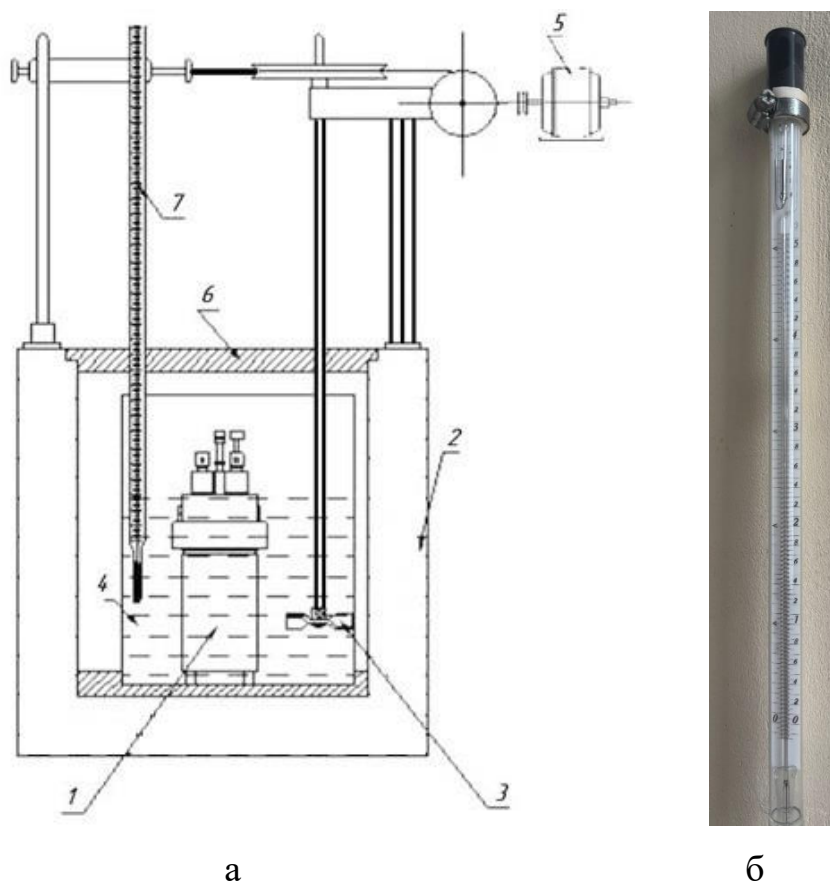


Рис. 3.7 – Схема експериментальної установки калориметру (а):
1 – калориметрична бомба; 2 – оболонка калориметра; 3 – мішалка;

4 –латунний посуд з дистильованою водою; 5 – електричний двигун;
6 – кришка; 7 – термометр Бекмана (б).

Джерело: фото автора.

У дослідженні застосовували термометр Бекмана (рис. 3.7, б) – це спеціальний ртутний термометр, призначений для точного вимірювання дуже малих змін температури (в межах 0–5 °С) у фізико-хімічних експериментах, у нашому випадку, для теплотехнічних досліджень. Конструкція термометра Бекмана така: має довгу вузьку капілярну трубку, заповнену ртуттю, з поділками 0,01 °С. Має розширене резервуарне дно (бульбу) та регульований рівень нульової точки. Спочатку термометр встановили так, щоб початкова температура експерименту відповідала нижній межі шкали, а в процесі експерименту реєстрували зміну температури, не виходячи за межі шкали.

Калориметр призначений для точного визначення кількості теплоти, що виділяється при повному згорянні зразка твердого палива. Основний принцип його роботи базується на законі збереження енергії: теплота, виділена при згорянні зразка, передається навколишньому середовищу калориметра, що дозволяє її кількісно виміряти. Застосування калориметра дозволяє отримати достовірні експериментальні дані щодо енергетичного потенціалу побутових відходів, що є ключовим при оцінюванні їх використання як компонентів для створення композиційного палива.

Перед використанням калориметр калібрували та визначали його енергетичний еквівалент (А). У даній роботі калібрування калориметра проводилося за допомогою струму та опору, так зване електричне калібрування. Електричне калібрування – це метод, при якому в камері калориметра виділяється точно відома кількість теплоти шляхом пропускання електричного струму через резистивний нагрівач. Процедура калібрування здійснено в декілька етапів:

1) заповнено калориметр дистильованою водою (2 літри) та встановлено в середину електронагрівач із відомим опором $R = 10,917 \text{ Ом}$;

2) виміряно початкову температуру;

- 3) подано струм;
- 4) виміряно кінцеву температуру (рис. 3.8).



Рис. 3.8 – Зняття показів температури за термометром Бекмана для калібрування калориметру

Джерело: фото автора.

Розрахунок виділеної теплоти проводиться за формулою:

$$Q_T = U \times I \times \Delta Z, \quad (3.5)$$

де Q_T – виділена теплота, Дж;

U – напруга, В;

I – сила струму, А;

ΔZ – інтервал часу, с.

Розрахунок теплоємності калориметра проводиться за формулою:

$$Q_K = Q_{yc} \times \Delta t, \quad (3.6)$$

де Q_K – теплоємність калориметра, Дж;

$Q_{уст}$ – еквівалентна теплоємність калориметра (з урахуванням води, посудини, мішалки тощо), Дж;

Δt – зміна температури (кінцева – початкова), °С.

Перевагами даного методу є те, що не потребує зразка з відомою теплотою згоряння (як у разі калібрування бензойною кислотою) й можливість багаторазового та точного введення певної кількості теплоти.

Для визначення енергетичного еквіваленту (А) використано залежність:

$$\Delta Q_{втр} = A \times \Delta t_i^{1+n} \times \Delta Z_i, \quad (3.7)$$

$$\left(\begin{array}{l} A_1 = \frac{\Delta Q_{втр1}}{\Delta t_1^{1+n} \times \Delta Z_1} \\ A_2 = \frac{\Delta Q_{втр2}}{\Delta t_2^{1+n} \times \Delta Z_2} \end{array} \right), \quad (3.8)$$

де А – енергетичний еквівалент;

$\Delta Q_{втрі}$ – втрата кількості теплоти, Дж;

Δt_i^{1+n} – зміна температури, °С;

n – степінь;

ΔZ_i – тривалість часового інтервалу, с.

Розв'язок системи рівнянь 3.8 дозволяє визначити n та А. На основі результатів калібрування отримано $n = 0$ та $A = 0,39$. Для оброблення даних дослідження і знаходження енергетичного еквіваленту було використано програмне забезпечення Microsoft Excel.

Наступним етапом дослідження було підготовлення до визначення теплотвірної здатності безпосередньо горючих фракцій побутових відходів і торфу. Підготовка зразків до експерименту включала декілька етапів: відбирання побутових відходів і торфу, їх сортування і доставка до місця проведення

досліджень. Перелік та алгоритм відбору проб описано в п. 3.2 Розділу 3 дисертаційного дослідження.

Наступним кроком було подрібнення дослідних зразків, використовуючи подрібнювач, щоб перетворити проби на дрібнодисперсну масу для забезпечення однорідності матеріалу (рис. 3.9, а). Подрібнена маса кожного виду відходу й торфу використана для формування паливних «таблеток» за допомогою лабораторного пресу. Для формування «таблеток» з твердих фракцій відходів було застосовано газовий пальник, який за рахунок невеликого підігріву розм'якшував структуру досліджуваного зразку (рис. 3.9, б).



а



б

Рис. 3.9 – Підготовка досліджуваних зразків для вимірювань теплотвірної здатності

Джерело: фото автора.

Процес пресування дозволив створити стандартизовані зразки (рис. 3.10, а), що містить мідний дріт, за допомогою якого запалюється досліджуваний зразок у маленькому тиглі калориметричної бомби (рис. 3.10, б).



а) стандартизовані «таблетки» з впресованим мідним дротом



б) стандартизовані «таблетки» з витягнутими «вусиками» мідного дроту

Рис. 3.10 – Досліджувані зразки з мідним дротом

Джерело: фото автора.

Вага кожної таблетки з мідним дротом дорівнювала $1 \text{ г} \pm 0,1 \text{ г}$ (рис. 3.11).



а)

б)

Рис 3.11 – Зважування зразків на аналітичних вагах:

а) поліпропілен; б) дерев'яні вироби з ясену.

Джерело: фото автора.

Досліджуваний зразок прикріплювали мідним дротом до «вилки» кришки калориметричної бомби. Бомбу герметизували, після чого її поміщали у внутрішній резервуар калориметру, який заповнений дистильованою водою об'ємом 2 л. Ініціювання згоряння відбувалося за допомогою електричного запалу, внаслідок чого підвищується температури води, яку виміряно термометром Бекмана. На основі отриманих даних узагальнено значення результатів експериментального дослідження (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Нижча теплота згоряння дослідних зразків

Показник	Вид палива							Торф ⁵
	Папір і картон (50:50) ¹	Папір глянцевий	Пластик		Текстиль синтетичний ³	Деревина ⁴		
			поліпропілен (PP)	поліетилен (LDPE) ²		ясен	сосна	
Теплота згоряння, МДж/кг	13,657	8,996	33,739	34,645	11,012	15,689	18,298	14,322
	15,105	8,887	30,854	34,312	14,197	16,307	17,904	14,951
	15,040	8,732	39,153	34,098	14,537	15,893	18,080	13,629
Середнє значення вимірювань, МДж/кг	14,601	8,872	34,582	34,352	13,249	15,963	18,084	14,301
Вологість⁶, %	11,5	13,2	4,8	6,1	15,5	12,8	11,7	7,3
Зольність⁷, %	5,1	11,4	0,8	1,1	1,4	2,3	1,2	17,1

Примітка:

¹ – папір та картон різного розміру та різної щільності непридатний для сортування як сировина через забрудненість;

² – LDPE – поліетилен високого тиску, низької щільності;

³ – шматки щільної тканини (синтетика);

⁴ – дерев'яні вироби;

⁵ – брикетований низинний торф;

⁶ – дані з таблиці 3.1;

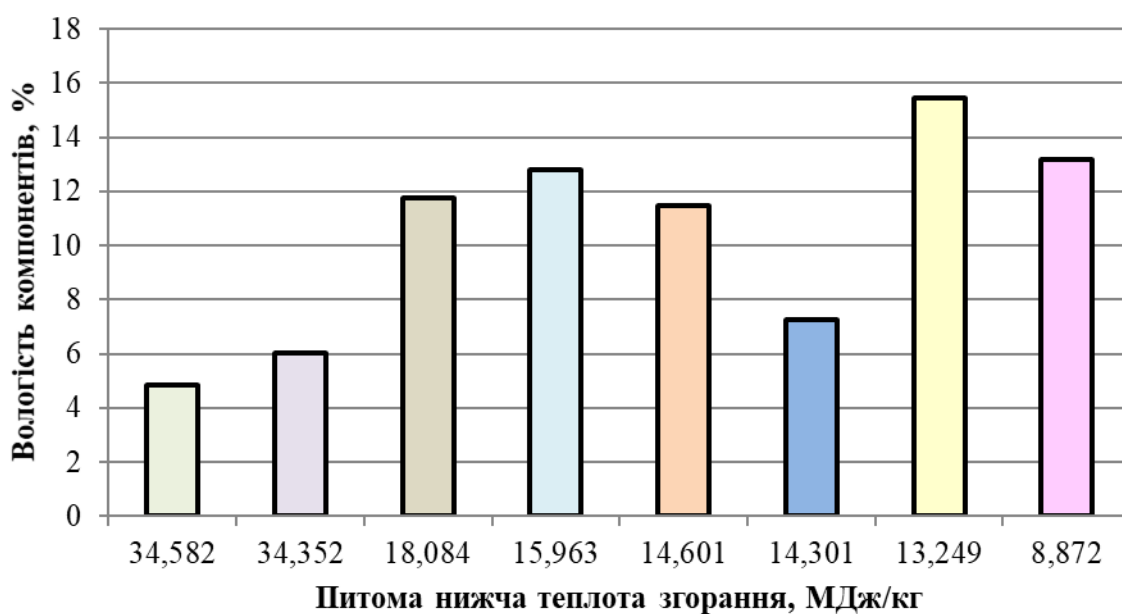
⁷ – дані з таблиці 3.2.

Джерело: створено автором на основі власних експериментальних досліджень.

З табл. 3.3 видно, що середнє значення теплоти згорання коливається від мінімального значення 8,872 МДж/кг (папір глянцекий) до максимального значення 34,582 МДж/кг (пластик (поліпропілен)) залежно від конкретного виду досліджуваного компоненту. Як показують результати, поліпропілен дає найбільшу теплоту згорання (34,582 МДж/кг), що спричинено значною щільністю матеріалу. Водночас, відібрані фракції глянцекого паперу показали найнижчий результат (8,872 МДж/кг), що свідчить про своєрідну структуру даного компоненту. Також під час дослідження встановлено, що раніше зазначений компонент має і високу зольність, що спричинена високим вмістом негорючих мінеральних речовин.

У ході роботи встановлено, що серед відібраних фракцій деревини, далі в експериментальних дослідженнях доцільно використовувати як компонент палива дерев'яні вироби із сосни за рахунок її більшої теплоти згорання (18,084 МДж/кг) порівняно з дерев'яними виробами із ясену (15,963 МДж/кг), та зв'язувальних властивостей завдяки особливостям структури.

Таким чином встановлено, що зі збільшенням вологості й зольності відходів прямо пропорційно знижується теплота згорання ПВ (рис. 3.12-3.13).

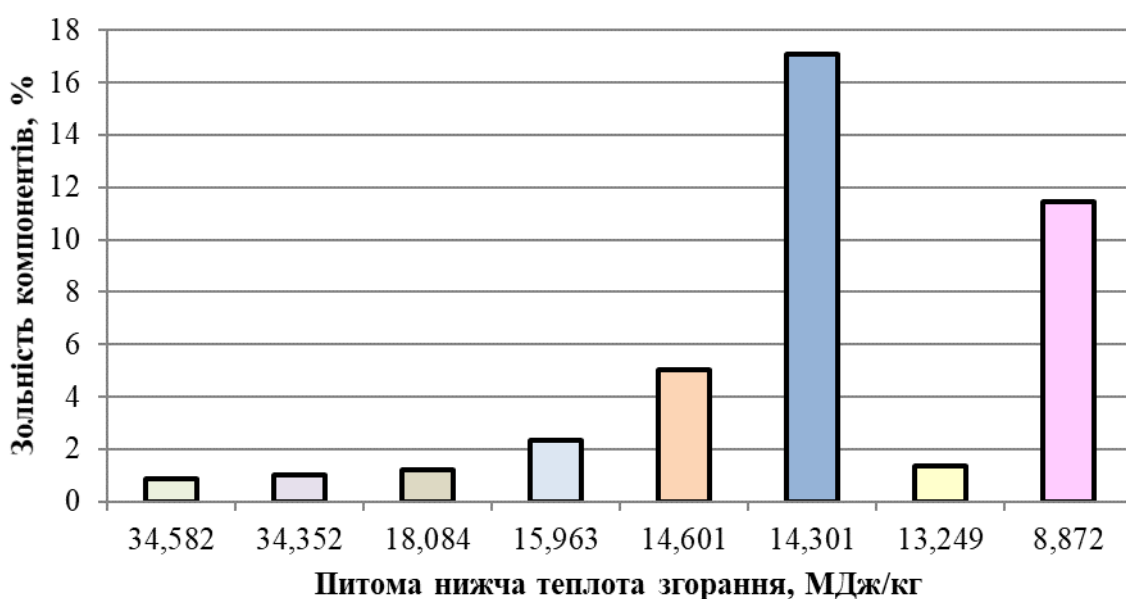


- Умовні позначення:
- поліпропілен;
 - поліетилен;
 - сосна;

- ясен;
- папір і картон;
- торф;
- текстиль синтетичний;
- папір глянцевий.

Рис. 3.12 – Залежність теплоти згорання побутових відходів від вологості

Джерело: створено автором на основі даних табл. 3.3.



- Умовні позначення:
- поліпропілен;
 - поліетилен;
 - сосна;
 - ясен;
 - папір і картон;
 - торф;
 - текстиль синтетичний;
 - папір глянцевий.

Рис. 3.13 – Залежність теплоти згорання побутових відходів від зольності

Джерело: створено автором на основі даних табл. 3.3.

Візуально представлені гістограми залежностей теплоти згорання від вологості та зольності вказують, що на початковому етапі підготовки побутових відходів до процесу спалювання доцільно провести сортування

(відокремлення горючих фракцій), подрібнення (для забезпечення однорідності) та сушіння за допомогою спеціалізованого обладнання. Такий підхід забезпечує підвищення теплотвірної здатності за рахунок контролю вологості й зольності відходів.

3.4 Дослідження рівня концентрацій забруднювальних речовин в димових газах під час спалювання побутових відходів і торфу

Визначення концентрацій шкідливих речовин у димових газах під час спалювання побутових відходів і торфу проведено на базі лабораторії кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» за допомогою газоаналізатору OKSI 5M. Опис використаного обладнання представлено в п. 2.6 Розділу 2 дисертаційного дослідження. Спалювання здійснювалося безпосередньо у твердопаливному котлі малої потужності (рис. 3.2). Конструкція котла складається з топки, конвективної та зольникової частини. Топка має великий об'єм і виконує функцію горіння палива, конвективна частина – «відбирає» тепло від продуктів горіння та має велику поверхню теплообміну. Зольникова частина слугує для накопичення попелу та відходів горіння. Продукти горіння палива проходять через димохід, після чого потрапляють у димову трубу.

У результаті проведених досліджень, що наведено в п. 3.3, встановили компоненти побутових відходів з найбільш оптимальними теплотехнічними характеристиками, які будуть надалі прийматися для експериментальних досліджень. Таким чином, підготовлено 15 проб для спалювання: папір і картон, пластик (поліпропілен), текстиль синтетичний, деревина (сосна) і торф (по три проби кожного компоненту для зменшення похибки вимірювань). Вага досліджуваних зразків становила $1,0 \pm 0,1$ кг.

Під час експериментального дослідження визначено концентрації карбон (II) оксиду, нітроген (II) оксиду, нітроген (IV) оксиду та сульфур (IV) оксиду. Встановлено відповідні середні концентрації забруднювальних речовин у

димових газах при спалюванні досліджуваних компонентів, що наведено в табл. 3.4.

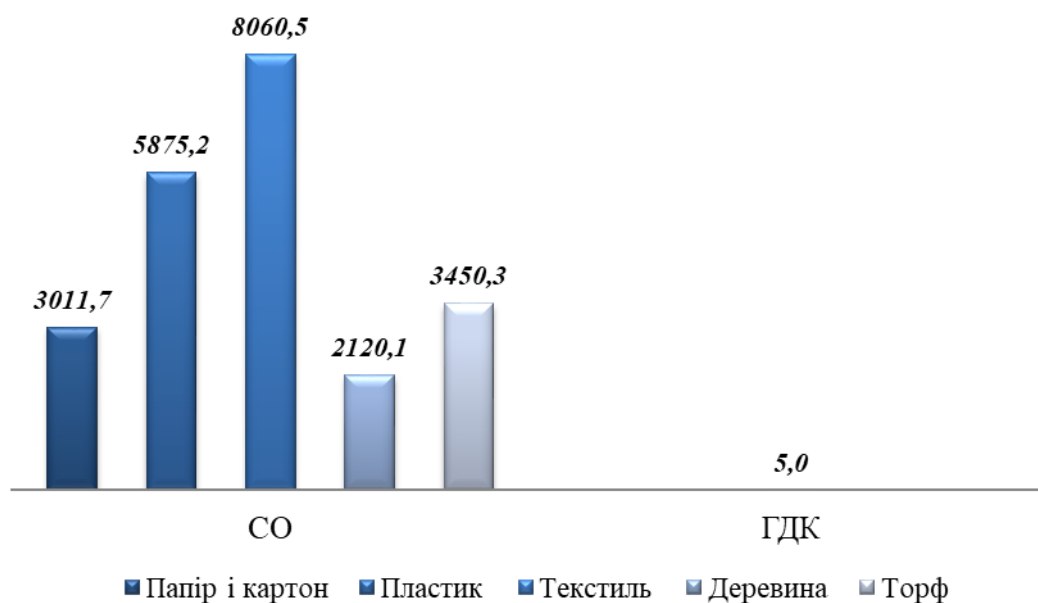
Таблиця 3.4

Середні концентрації газоподібних токсичних речовин

Середня концентрація, мг/м ³	Вид палива					ГДК, мг/м ³ [161]
	Папір і картон	Пластик (поліпропілен)	Текстиль синтетичний	Дерев'яні вироби	Торф брикетований	
CO	3011,7	5875,2	8060,5	2120,1	3450,3	5,0
NO	107,1	285,4	310,2	114,6	115,5	0,4
NO ₂	163,4	367,3	340,6	135,9	178,2	0,2
SO ₂	382,6	210,8	225,1	142,2	360,7	0,5

Джерело: створено автором на основі власних експериментальних досліджень та [161].

Для візуалізації отриманих значень, що представлені в табл. 3.4, побудовано гістограми. Оскільки дослідження виконувалися на експериментальній установці, яка використовується для досліджень, розробок та випробувань щодо удосконалення процесів спалювання та на якій обробляють менше 50 тонн відходів на рік [162], отримані результати порівняно з гранично допустимими концентраціями (максимальноразовими) хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць [161] (рис. 3.14-3.17).

Рис. 3.14 – Концентрація вуглецю (II) оксид (CO), мг/м³

Джерело: створено автором на основі даних табл. 3.4.

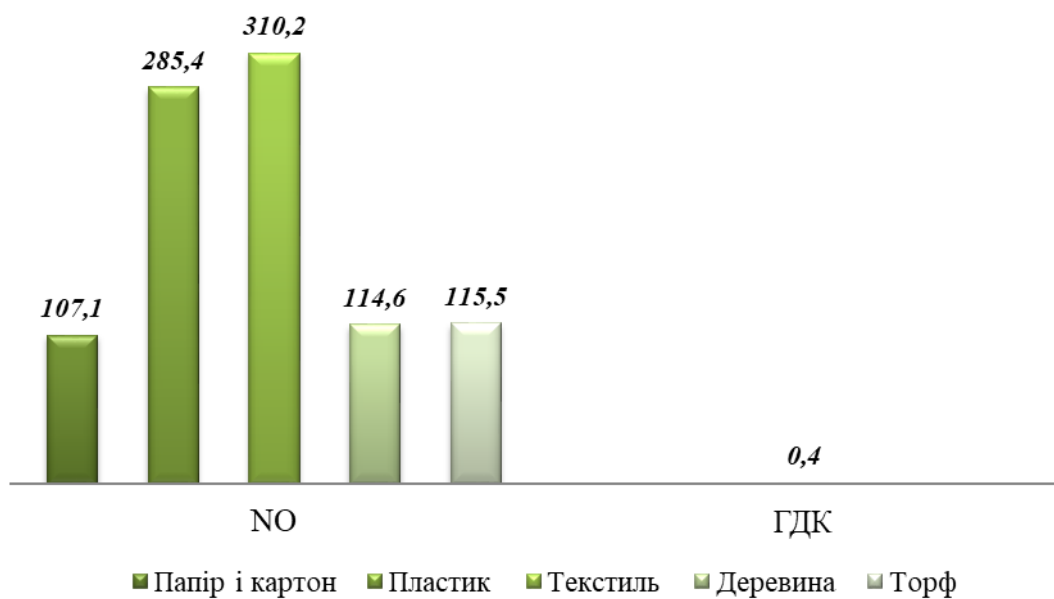


Рис. 3.15 – Концентрація азоту (II) оксид (NO), мг/м³

Джерело: створено автором на основі даних табл. 3.4.

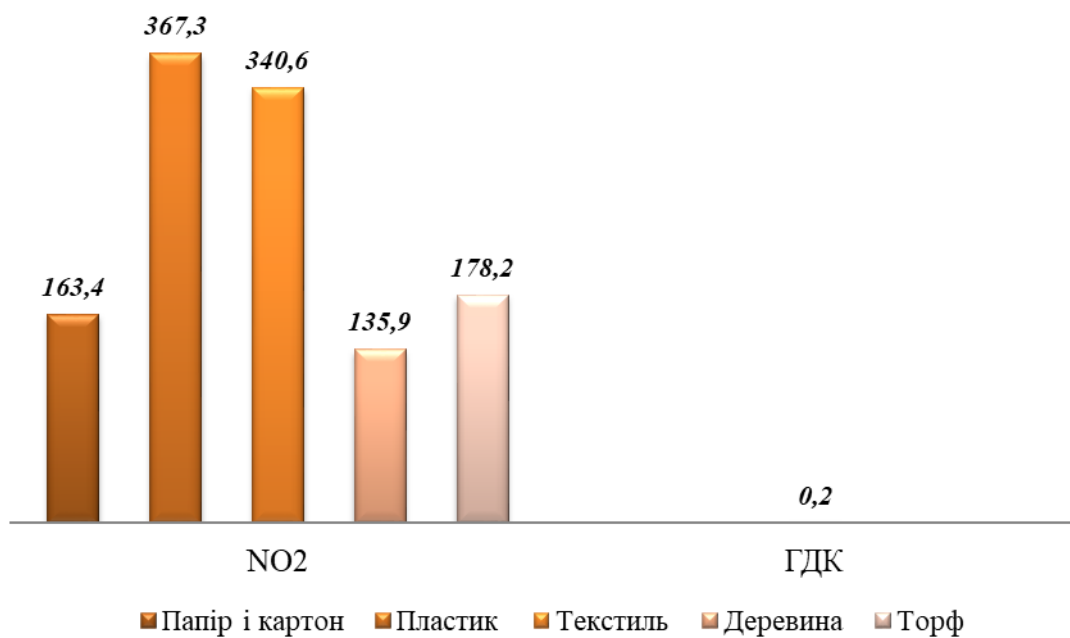


Рис. 3.16 – Концентрація азоту (IV) оксид (NO₂), мг/м³

Джерело: створено автором на основі даних табл. 3.4.

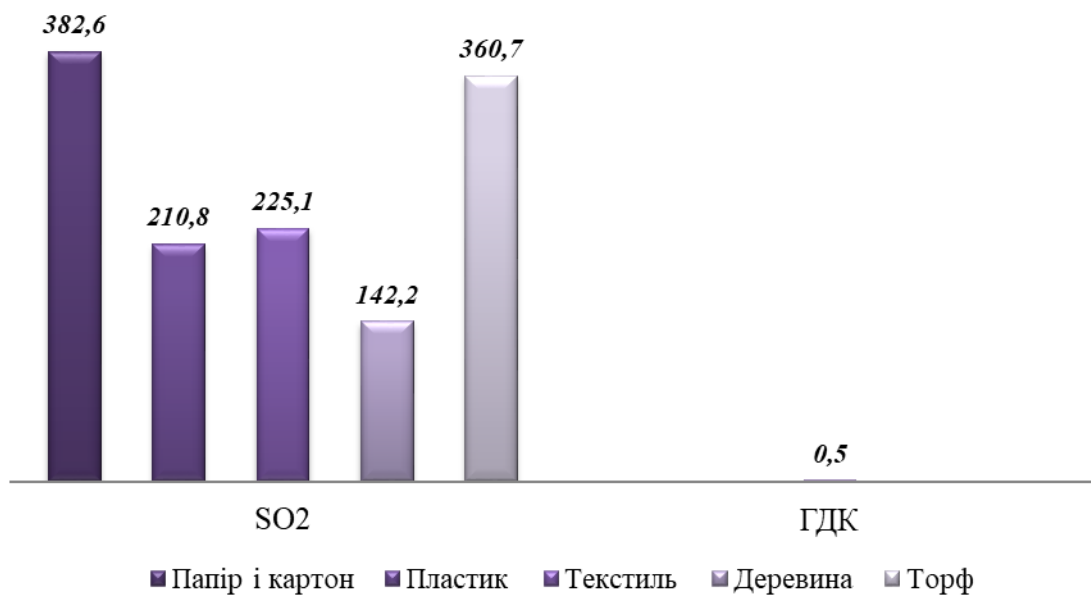


Рис. 3.17 – Концентрація сульфур (IV) оксид (SO₂), мг/м³

Джерело: створено автором на основі даних табл. 3.4.

Аналіз гістограм на рис. 3.14-3.17 показує, що концентрації газоподібних забруднювальних речовин, що вимірювалися у димових газах, перевищують граничнодопустимі концентрації речовин в атмосферному повітрі [161]. Високі концентрації CO (max = 8060,5 мг/м³ (текстиль синтетичний), min = 2120,1 мг/м³ (дерев'яні вироби) (рис. 3.14) при спалюванні спричинені неповним згорянням, при нестачі кисню або недостатньо високій температурі, та в залежності від хімічного складу й структури компонентів.

Значні концентрації NO (max = 310,2 мг/м³ (текстиль синтетичний), min = 107,1 мг/м³ (папір і картон) (рис. 3.15) при спалюванні досліджуваних зразків виникли через нестабільний режим горіння і надлишку кисню та наявність азоту в складі побутових відходів.

Значні концентрації NO₂ (max = 367,3 мг/м³ (пластик), min = 135,9 мг/м³ (дерев'яні вироби) (рис. 3.16) при спалюванні компонентів утворилися внаслідок окиснення нітроген (II) оксиду у димових газах. Основними причинами є високі температури горіння, надлишок кисню та наявність азотовмісних речовин у побутових відходах.

Значні концентрації SO_2 ($\text{max} = 382,6 \text{ мг/м}^3$ (папір і картон), $\text{min} = 142,2 \text{ мг/м}^3$ (дерев'яні вироби) (рис. 3.17) при спалюванні побутових відходів і торфу виникли через згоряння сірковмісних матеріалів при високих температурах горіння.

Таким чином, для зменшення впливу концентрацій забруднювальних речовин в атмосферному повітрі важливо використовувати сучасні технології очищення відходів та ефективні системи фільтрації, щоб забезпечити безпечний та екологічно чистий процес спалювання. Наприклад, автори [163, 164] пропонують чотирьохступеневу схему очищення газових викидів за рахунок пиловловлювачів: циклон СК-ЦН 34 (33), скруббер Вентурі, рукавний фільтр, вугільний фільтр. У свою чергу, авторами [165] запропоновано метод зниження концентрації монооксиду вуглецю за рахунок підвищення температури дуттового повітря до $200 \text{ }^\circ\text{C}$, що дозволяє майже вдвічі зменшити концентрацію CO .

Висновки до розділу 3

1. Аналіз літературних джерел вказує, що «забезпечення відкритості, безпеки, життєстійкості й екологічної стійкості міст, інших населених пунктів» та «забезпечення переходу до раціональних моделей споживання і виробництва», зумовлює дотримання принципів циркулярної економіки, що робить регіон інвестиційно привабливим.

2. У ході роботи експериментальним шляхом визначено показник вологості та зольності горючих фракцій побутових відходів і торфу. Під час дослідження встановлено, що зола є індикатором ефективності спалювання того чи іншого компонента побутових відходів за рахунок кольору, який залишається у тиглях після озолення зразків. Тобто білий або сіро-коричневий колір свідчить, що в золі залишився низький відсоток вуглецю, а чорна зола – про високий відсоток вуглецю, що залишився в золі.

3. Встановлено, що папір і картон, текстиль синтетичний і торф характеризуються схожим рівнем теплотвірної здатності. З іншої сторони результати вимірювань рівнів теплотвірної здатності побутових відходів

вказують на високу розбіжність між максимальною (поліпропілен – 34,582 МДж/кг) та мінімальною (папір глянцева – 8,872 МДж/кг) теплотою згорання. Зокрема, встановлено, що зі збільшенням вологості й зольності прямо пропорційно знижується теплота згорання ПВ, а відповідно, і теплоефективність. Звідси випливає, що теплова цінність відходів прямо пропорційна вмісту вуглецю у відходах і обернено пропорційна зольності і вмісту вологи. Це свідчить, що застосування горючих фракцій побутових відходів і торфу як палива доцільно при їх попередньому підготовленні, зокрема, висушуванні, для запобігання зниження теплотвірної здатності.

4. Встановлено, що концентрації забруднювальних речовин у димових газах під час спалювання побутових відходів і торфу перевищують граничнодопустимі концентрації речовин в атмосферному повітрі. Значення концентрації СО коливаються від 8060,5 мг/м³ до 2120,1 мг/м³ (при ГДК = 5,0 мг/м³), NO – від 310,2 мг/м³ до 107,1 мг/м³ (при ГДК = 0,4 мг/м³), NO₂ – від 367,3 мг/м³ до 135,9 мг/м³ (при ГДК = 0,2 мг/м³) та SO₂ – від 382,6 мг/м³ до 142,2 мг/м³ (при ГДК = 0,5 мг/м³). Шляхи вирішення даного питання полягають у застосуванні чотирьохступеневої схеми очищення газів [163, 164] та регулювання температури повітря [165].

Результати проведених досліджень опубліковані у роботах [166-173].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ СУМІШЕЙ ЯК УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

4.1 Енергетичний потенціал композиційних сумішей з горючих фракцій побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини

Дослідження, проведені в Розділі 3 дисертаційної роботи, вказують на важливість розроблення паливних композицій з торфу та горючих фракцій побутових відходів, метою яких є отримання палива з достатньою теплотою згорання, стабільними характеристиками горіння та мінімальними ризиками утворення токсичних речовин.

Для визначення теплоти згорання композиційних сумішей відібрано горючі фракції побутових відходів, які мають найбільшу теплотвірну здатність, відповідно до результатів експериментального дослідження, що наведено в п. 3.3, і торф. Характеристику компонентів із зазначеною нижчою теплотою згорання наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Характеристика досліджуваних компонентів суміші

№ з/п	Компонент суміші	Характеристика компоненту суміші	Нижча теплота згорання, МДж/кг
1	Папір і картон (50:50)	Папір та картон різного розміру та різної щільності, не придатний для сортування як сировина через забрудненість	14,601
2	Пластик	Поліпропілен (PP)	34,582
3	Текстиль синтетичний	Шматки щільної тканини (синтетика)	13,249
4	Деревина	Дерев'яні вироби із сосни	18,084
5	Торф	Брикетований низинний торф	14,301

Джерело: створено автором на основі даних табл. 3.3.

У роботі використано підхід до формування сумішей на основі математичного моделювання теплотвірної здатності та вмісту ключових

елементів, з подальшою лабораторною перевіркою кожного варіанту. Дослідження ефективності створення композиційних сумішей з горючих фракцій побутових відходів і торфу проведено відповідно до матриці планування експерименту, що реалізує повний факторний експеримент $N = 2^k = 2^5 = 32$. Основний рівень й інтервал варіювання факторів узяті з результатів натурних досліджень і прийнято варіювати їх на двох рівнях. Інтервали зміни факторів та їх значення у натуральному масштабі на основному, верхньому та нижньому рівнях наведено у табл. 2.8 Розділу 2.

У відповідності з обраним планом експерименту (2^5) виконано 32 досліді (табл. 4.2), кожний з яких повторювали 3 рази.

Таблиця 4.2

Матриця планування експерименту

№ досліді	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
1	+	+	+	+	+	21,715
2	-	+	+	+	+	22,804
3	+	-	+	+	+	19,783
4	-	-	+	+	+	20,071
5	+	+	-	+	+	22,876
6	-	+	-	+	+	23,741
7	+	-	-	+	+	21,243
8	-	-	-	+	+	23,039
9	+	+	+	-	+	21,007
10	-	+	+	-	+	22,641
11	+	-	+	-	+	19,147
12	-	-	+	-	+	20,825
13	+	+	-	-	+	21,103
14	-	+	-	-	+	23,664
15	+	-	-	-	+	22,501
16	-	-	-	-	+	24,127
17	+	+	+	+	-	31,025
18	-	+	+	+	-	32,412
19	+	-	+	+	-	29,141
20	-	-	+	+	-	30,883
21	+	+	-	+	-	31,478
22	-	+	-	+	-	32,876
23	+	-	-	+	-	30,115
24	-	-	-	+	-	28,745
25	+	+	+	-	-	27,864
26	-	+	+	-	-	30,065

27	+	-	+	-	-	29,216
28	-	-	+	-	-	28,855
29	+	+	-	-	-	30,253
30	-	+	-	-	-	33,741
31	+	-	-	-	-	28,932
32	-	-	-	-	-	32,012

Джерело: створено автором на основі даних табл. 2.8.

За матрицею планування та результатами дослідів розраховуємо коефіцієнти регресії та отримуємо наступні значення:

$$a_0 = \frac{1}{32} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + y_9 + y_{10} + y_{11} + y_{12} + y_{13} + y_{14} + y_{15} + y_{16} + y_{17} + y_{18} + y_{19} + y_{20} + y_{21} + y_{22} + y_{23} + y_{24} + y_{25} + y_{26} + y_{27} + y_{28} + y_{29} + y_{30} + y_{31} + y_{32}) \quad (4.1)$$

$$a_0 = 26,184; a_1 = -0,722; a_2 = 0,645; a_3 = -0,718; a_4 = 0,184; a_5 = -4,291.$$

Зведені дані повного факторного експерименту (нижча теплота згорання) наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Зведені дані повного факторного експерименту

№ дослідів	У _{експ}	ȳ _{експ}	S _{у_и2} (дисперсія)	Урозр (не розкодоване)	Δy	Δy ₂
1	24,445	21,715	6,164	21,284	0,431	0,185
	21,271					
	19,552					
2	23,654	22,804	1,164	22,728	0,076	0,006
	22,903					
	21,541					
3	20,187	19,783	0,984	19,995	0,212	0,045
	19,722					
	18,441					
4	17,286	20,071	6,573	21,439	1,368	1,871
	22,074					
	21,245					
5	21,364	22,876	1,441	22,721	0,155	0,024
	23,645					
	22,815					
6	22,274	23,741	1,160	24,165	0,425	0,180
	24,124					
	23,887					
7	20,211	21,243	2,247	21,432	0,189	0,036

	23,084					
	21,441					
8	21,111	23,039	5,415	22,876	0,163	0,027
	23,012					
	25,706					
9	19,318	21,007	4,622	20,909	0,098	0,009
	20,088					
	23,362					
10	20,652	22,641	2,971	22,354	0,287	0,083
	22,364					
	24,023					
11	18,361	19,147	7,007	19,621	0,474	0,224
	22,314					
	17,312					
12	20,223	20,825	3,442	21,064	0,239	0,057
	22,745					
	19,141					
13	20,126	21,103	2,496	22,347	1,244	1,547
	21,066					
	23,112					
14	23,396	23,664	2,839	23,791	0,127	0,016
	21,635					
	24,885					
15	23,238	22,501	0,813	21,057	1,444	2,084
	22,332					
	21,474					
16	25,171	24,127	1,242	22,501	1,626	2,643
	23,014					
	24,521					
17	30,961	31,025	2,769	29,867	1,158	1,340
	29,781					
	33,022					
18	31,342	32,412	2,306	31,311	1,101	1,212
	32,587					
	34,266					
19	29,625	29,141	3,281	28,578	0,563	0,317
	30,721					
	27,184					
20	30,925	30,883	4,313	30,022	0,861	0,742
	28,626					
	32,762					
21	31,022	31,478	4,766	31,304	0,174	0,030
	29,114					
	33,411					
22	30,936	32,876	2,497	32,748	0,128	0,016
	33,842					
	33,421					
23	32,144	30,115	3,933	30,015	0,1	0,010
	28,181					
	30,022					
24	30,905	28,745	7,073	31,459	2,714	7,365
	29,589					
	25,784					
25	26,819	27,864	2,134	29,493	1,629	2,653

	27,171					
	29,506					
26	30,986	30,065	7,751	30,937	0,872	0,760
	31,726					
	33,514					
27	27,181	29,216	4,563	28,203	1,013	1,025
	30,502					
	31,041					
28	27,045	28,855	2,718	29,647	0,792	0,628
	30,123					
	28,112					
29	29,126	30,253	1,974	30,930	0,677	0,458
	31,717					
	30,984					
30	32,685	33,741	0,997	32,374	1,367	1,870
	33,782					
	34,678					
31	27,338	28,932	3,307	29,641	0,709	0,502
	30,658					
	27,886					
32	32,377	32,012	5,484	31,084	0,928	0,861
	34,725					
	30,148					
Σ			110,449			28,639

Джерело: створено автором на основі розрахунків.

Далі представлена послідовність оброблення результатів експерименту, для рівномірного дублювання дослідів. Розраховуємо дисперсію для кожного досліду, а потім перевіряємо однорідність ряду построчних дисперсій. Для цього розраховуємо величину критерію Кохрена:

$$G^{розр} = \frac{S_{уи\max}^2}{\sum S_{уи}^2} \quad (4.2)$$

$$G^{розр} = \frac{7,751}{110,449} = 0,07$$

При $\alpha = 0,05$, числі ступенів свободи $f = n-1=2$ і числі дослідів $N = 32$, табличне значення:

$$G^{табл}_{0,05;2;32} = 0,146$$

Оскільки виконується умова $G^{\text{розр}} < G^{\text{табл}}$, тобто $0,07 < 0,146$, тому ряд дисперсій можна вважати однорідним.

Перевіряємо статистичну значущість коефіцієнтів за t-критерієм Стьюдента. Розраховуємо довірчий інтервал за формулою:

$$\Delta a_i = t_{\alpha; f_1} \times S_{ai}, \quad (4.3)$$

де $t_{\alpha; f_1}$ – критерій Стьюдента, табличне значення,

S_{ai} – середньоквадратична похибка у визначенні коефіцієнта регресії.

$$\Delta a_i = 2,00 \times 0,094 = 0,19$$

Коефіцієнти, абсолютне значення яких дорівнює довірчому інтервалу або більше, слід визнати статистично значущими. У даному випадку всі коефіцієнти є значущими.

Після реалізації повного факторного експерименту 2^5 отримано наступне рівняння регресії:

$$y = 26,184 - 0,722x_1 + 0,645x_2 - 0,719x_3 + 0,187x_4 - 4,291x_5 \quad (4.4)$$

Перевіряємо адекватність моделі. Гіпотезу про адекватність моделі перевіряємо за критерієм Фішера. Розрахункове значення F-критерію визначаємо за формулою:

$$F^{\text{розр}}_{f_2; f_1} = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \quad (4.5)$$

де S_y^2 – дисперсія дослідів;

$S_{ад}^2$ – дисперсія адекватності моделі, яка при наявності n повторних дослідів дорівнює:

$$S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{u=1}^k N_{u=1} (y_{u\text{розр}} - y_{u\text{експ}})^2}{f}, \quad (4.6)$$

де n – кількість повторних дослідів;

$y_{u\text{розр}}$ – розрахункове значення відгуку y в u -м досліді;

$\bar{y}_{u\text{експ}}$ – середнє значення відгуку y , отриманих в u -повторностях дослідів;

f – кількість степенів свободи ($f = N - (k + 1)$).

Гіпотезу про адекватність рівняння приймають тоді, коли розрахункове значення F -критерію не перевищує табличне для обраного рівня значущості:

$$F_{f2;f1}^{\text{розр}} = \frac{6,32}{3,45} = 1,83;$$

$$F_{0,01;26;64}^{\text{табл}} = 1,79.$$

Розрахунковий критерій менше табличного, як при 1% ($F_{0,01;26;64}^{\text{табл}} = 1,79$), так і при 5% ($F_{0,05;26;64}^{\text{табл}} = 1,65$) рівнях значущості.

Отже, з метою отримання адекватної моделі вирішено застосувати розширену матрицю планування експерименту 2^5 . В цьому випадку ефект одного з факторів залежить від рівня, на якому знаходиться інший – тобто ефект взаємодії двох чи більшого числа факторів. Повний факторний експеримент дозволить кількісно оцінити ефекти взаємодії.

Для розрахунку коефіцієнтів регресії моделі побудовано розширену матрицю планування, яка разом з результатами дослідів і перевіркою значущості коефіцієнтів регресії наведені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Розширена матриця плану, результати дослідів і перевірка значущості коефіцієнтів регресії

Номер дослідів	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_1x_5	x_2x_3	x_2x_4	x_2x_5	x_3x_4	x_3x_5	x_4x_5	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-
3	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-
4	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
5	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-
6	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+
7	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+
8	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-
9	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+
10	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-
11	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-
12	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+
13	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-
14	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+
15	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
17	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+
18	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-
19	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-
20	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+
21	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-
22	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+
23	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
24	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-
25	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+
26	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-
27	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-

28	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+
29	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-
30	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+
31	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
32	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Критерій Стьюдента $f = 64$; $a = 0,05$; $t_r = 2,00$; $t_p = 0,19$																	
b_i	26,184	-0,722	0,645	-0,718	0,187	-4,291	-0,192	<i>0,118</i>	0,272	<i>0,001</i>	<i>0,081</i>	0,349	<i>-0,09</i>	<i>0,326</i>	<i>-0,18</i>	<i>-0,171</i>	<i>0,007</i>
Висновок	ЗН	ЗН	ЗН	ЗН	ЗН	ЗН	ЗН	<i>НЗ</i>	ЗН	<i>НЗ</i>	<i>НЗ</i>	ЗН	<i>НЗ</i>	ЗН	<i>НЗ</i>	<i>НЗ</i>	<i>НЗ</i>

Продовження табл. 4.4

Номер досліджу	$x_1x_2x_4$	$x_1x_2x_5$	$x_1x_3x_4$	$x_1x_3x_5$	$x_1x_4x_5$	$x_2x_3x_4$	$x_2x_3x_5$	$x_2x_4x_5$	$x_3x_4x_5$	$x_1x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_5$	$x_1x_2x_4x_5$	$x_1x_2x_3x_4x_5$	y
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	21,715
2	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	22,804
3	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	19,783
4	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	20,071
5	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	+	22,876
6	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	23,741
7	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	21,243
8	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-	23,039
9	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	21,007
10	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	22,641
11	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	19,147
12	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	20,825
13	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	21,103
14	+	-	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+	-	23,664
15	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	22,501
16	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+	24,127
17	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	31,025
18	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	32,412
19	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	29,141

20	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	30,883
21	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	31,478
22	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	32,876
23	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	30,115
24	+	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	28,745
25	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	27,864
26	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	30,065
27	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	29,216
28	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	28,855
29	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	30,253
30	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	33,741
31	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	28,932
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	32,012
Критерій Стьюдента $f = 64$; $a = 0,05$; $t_r = 2,00$; $t_p = 0,19$														
b_i	0,049	0,144	-0,232	0,017	-0,056	-0,065	0,411	1,302	-0,248	0,081	-0,054	1,441	-0,252	-
Висновок	нз	нз	зн	нз	нз	нз	зн	зн	зн	нз	нз	зн	зн	-

Джерело: створено автором на основі розрахунків.

Після реалізації повного факторного експерименту 2^5 з розширеною матрицею плану отримано наступне рівняння регресії:

$$y = 26,184 - 0,722x_1 + 0,645x_2 - 0,719x_3 + 0,187x_4 - 4,291x_5 - 0,192x_1x_2 + 0,272x_1x_4 + 0,351x_2x_4 + 0,326x_3x_4 - 0,232x_1x_3x_4 + 0,411x_2x_3x_5 + 1,302x_2x_4x_5 - 0,248x_3x_4x_5 + 1,441x_1x_2x_4x_5 - 0,252x_1x_2x_3x_4x_5 \quad (4.7)$$

Гіпотезу про адекватність моделі перевіряємо за критерієм Фішера, його розрахункове значення при $f_2 = 16$; $a = 0,01$:

$$F^{\text{розрах}}_{f_2;f_1} = \frac{1,81}{3,45} = 0,52;$$

$$F^{\text{табл}}_{0,01;16;64} = 2,89.$$

Розрахункове значення критерію Фішера менше табличного при 1 %-му рівні значущості. Отже, гіпотеза про адекватність моделі не відкидається, а отримане рівняння регресії адекватно описує експеримент.

Для візуалізації аналізу отриманої математичної моделі побудовано діаграму впливу факторів на ефективність процесу створення композиційної суміші (рис. 4.1).

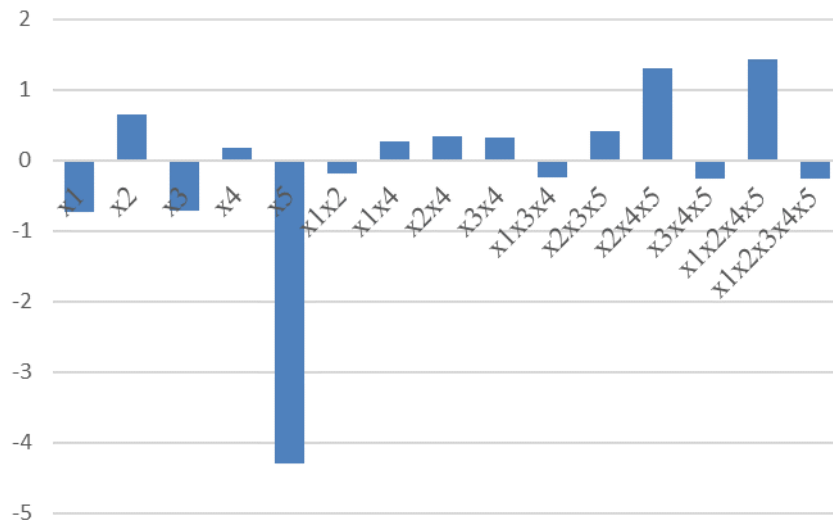


Рис. 4.1 – Діаграма впливу факторів на ефективність процесу створення композиційної суміші

Джерело: створено автором на основі даних табл. 4.4.

Від'ємні значення на рис. 4.1 означають, що при зменшенні фактору зменшується параметр відгуку, додатні значення – при збільшенні фактору збільшується параметр відгуку.

4.1.1 Дослідження функції на екстремум

Побудована математична модель у кодованих змінних має вигляд:

$$y = 26,184 - 0,722x_1 + 0,645x_2 - 0,719x_3 + 0,187x_4 - 4,291x_5 - 0,192x_1x_2 + 0,272x_1x_4 + 0,351x_2x_4 + 0,326x_3x_4 - 0,232x_1x_3x_4 + 0,411x_2x_3x_5 + 1,302x_2x_4x_5 - 0,248x_3x_4x_5 + 1,441x_1x_2x_4x_5 - 0,252x_1x_2x_3x_4x_5,$$

де кодовані змінні пов'язані з натуральними наступними співвідношеннями:

$$x_1 = \frac{A-22,925}{9,075}; x_2 = \frac{B-50,535}{13,765}; x_3 = \frac{C-9,5}{5,5}; x_4 = \frac{D-1}{1}; x_5 = \frac{E-30}{20}.$$

Зауважимо, що сумарне значення натуральних змінних повинно дорівнювати 100%, тому фактично одержану функцію можна вважати функцією чотирьох змінних. Виразимо, наприклад, змінну D через інші чотири змінні $D = 100 - A - B - C - E$, після чого одержана функція набуде вигляду:

$$\begin{aligned} f(x) = & 270,6987747 - 9,816666666A - 0,1401420269B - 0,317727272C - \\ & 0,4015500000E - 0,192 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) + 0,272 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) (99 - A - \\ & B - C - E) + 0,351 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) + 0,326 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - \\ & A - B - C - E) - 0,232 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) + \\ & 0,411 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1,302 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - \\ & E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0,248 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1,441 \left(\frac{40A}{3} - \right. \\ & \left. \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0,252 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \right. \\ & \left. \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Дослідимо одержану функцію на екстремум (локальний максимум). Зауважимо, що контекст задачі обмежує її область визначення невід'ємними значеннями. Припустимо, що функція $f = f(A, B, C, E)$ має в точці $M_0(A_0, B_0, C_0, E_0) \in R^4$ локальний екстремум. Тоді, якщо в цій точці існують частинні похідні першого порядку по всіх змінних, то всі вони рівні нулю. Таким чином, в цьому випадку екстремальні точки функції задовольняють системі рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f(A, B, C, E)}{\partial A} = 0 \\ \frac{\partial f(A, B, C, E)}{\partial B} = 0 \\ \frac{\partial f(A, B, C, E)}{\partial C} = 0 \\ \frac{\partial f(A, B, C, E)}{\partial E} = 0 \end{array} \right. \quad (4.9)$$

Остання умова є необхідною для існування локального екстремуму. Точки, в яких виконується необхідна умова, називають стаціонарними. Отже, може набувати локального екстремуму тільки в стаціонарних точках або в точках, в яких частинні похідні першого порядку не існують. Всі ці точки називають точками можливого екстремуму. Всеможливі набори таких точок з дійсними значеннями змінних знайдено і наведено у Додатку Г. Зауважимо, що змінні можуть набувати лише невід'ємних значень, тому одержимо наступні стаціонарні точки:

$$\{A = 22.84662786, B = 49.44998188, C = 10.71809410, E = 72.67307411\},$$

$$\{A = 23.12548742, B = 48.20679277, C = 17.97309242, E = 25.61059759\},$$

$$\{A = 23.24067543, B = 41.60387202, C = 24.35653000, E = 18.77883333\},$$

$$\{A = 23.16084136, B = 21.56605807, C = 28.02658164, E = 27.19528555\},$$

$$\{A = 34.56944394, B = 12.13313578, C = 29.39792289, E = 22.71687863\}.$$

Нехай точка $M_0(A_0, B_0, C_0, E_0) \in R^4$ – стаціонарна точка. Припустимо, що в деякому околі цієї точки існують неперервні частинні похідні другого порядку. Запишемо матрицю Гессе для нашої функції:

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial A^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial A \partial B} & \frac{\partial^2 f}{\partial A \partial C} & \frac{\partial^2 f}{\partial A \partial E} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial B \partial A} & \frac{\partial^2 f}{\partial B^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial B \partial C} & \frac{\partial^2 f}{\partial B \partial E} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial C \partial A} & \frac{\partial^2 f}{\partial C \partial B} & \frac{\partial^2 f}{\partial C^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial C \partial E} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial E \partial A} & \frac{\partial^2 f}{\partial E \partial B} & \frac{\partial^2 f}{\partial E \partial C} & \frac{\partial^2 f}{\partial E^2} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Визначники, складені з елементів перших k рядків і k стовпців, називаються головними мінорами даної матриці і позначаються D_1, D_2, D_3, D_4 .

Достатня умова локального екстремуму (критерій Сільвестра):

- 1) якщо всі головні мінори додатні, то функція має в точці M_0 локальний мінімум;
- 2) якщо знаки мінорів чергуються, причому $D_1 < 0$, то M_0 – точка локального максимуму.

Запишемо матрицю Гессе і обрахуємо головні мінори в кожній стаціонарній точці (обчислення наведено в Додатку Г). Як бачимо, дана функція не має локальних екстремумів, всі одержані стаціонарні точки є сідловими. Таким чином, доведено, що побудована функція на області визначення не має локальних екстремумів. Чисельну реалізацію пошуку точок екстремуму виконано за допомогою програмного забезпечення **Maple**, що дозволило автоматизувати процес громіздких обчислень.

4.1.2 Оптимізація функції за допомогою методу градієнтного підйому

Оскільки при дослідженні не виявлено точок екстремуму, то спробуємо оптимізувати одержане експериментальним шляхом найбільше значення функції. Використаємо метод градієнтного підйому.

Градієнтний метод – один із найпоширеніших регулярних методів пошуку оптимальних значень цільової функції. Процес оптимізації за методом градієнта

полягає у визначенні напрямку найбільшої зміни цільової функції і наступному переміщенні за цим напрямом. Напрямок найбільшої зміни функції визначається напрямом градієнта функції, що оптимізується. Градієнтний метод належить до групи методів спуску (підйому), які є чисельними методами розв'язання задач безумовної оптимізації (мінімізації або максимізації). Розглянемо градієнтний підйом:

$$f(X) \rightarrow \max, X \in R^n \quad (4.11)$$

Розпочинаючи із заданої початкової точки, градієнтні методи підйому дозволяють будувати послідовність $X^{(1)}, X^{(2)}, X^{(3)}, \dots$, що задовольняють умову $f(X^{(k)}) > f(X^{(k-1)})$, $k = 1, 2, \dots$

У загальній схемі методів підйому послідовність $X^{(1)}, X^{(2)}, X^{(3)}, \dots$, наближень до точки максимуму X^* обирають за правилом:

$$X^{(k)} = X^{(k-1)} + \alpha_k \Delta X^{(k)} \quad (4.12)$$

при цьому $\Delta X^{(k)} = \text{grad}(X^{(k)})$ – вектор, що визначає напрям зростання функції $f(X)$ (напрямок підйому) у точці $X^{(k-1)}$;

α_k – скаляр, що визначає довжину кроку впоодовж $\Delta X^{(k)}$ [174].

Будемо оптимізувати найбільше експериментально одержане значення: $A_0 = 21$, $B_0 = 56$, $C_0 = 6$, $D_0 = 2$, $E_0 = 15$. Прийmemo $\alpha = 0,01$ та виконаємо 100 ітерацій. Для цього розроблено програму в середовищі комп'ютерної алгебри **Maple**, яка дозволила виконати чисельні обчислення та отримати оптимальні значення параметрів моделі (Додаток Д).

Як бачимо, після оптимізації значення функції отримаємо наступне, найбільше значення функції 30132.67190000 одержується на 44-й ітерації при таких значеннях параметрів: $A = 0.00000000$, $B = 70.75466994$, $C = 0.00000000$, $D = 29.24533005$, $E = 0.00000000$.

Таким чином, одержано сідлові точки з координатами, які дають найбільші значення ефективності (рис. 4.2-4.5).

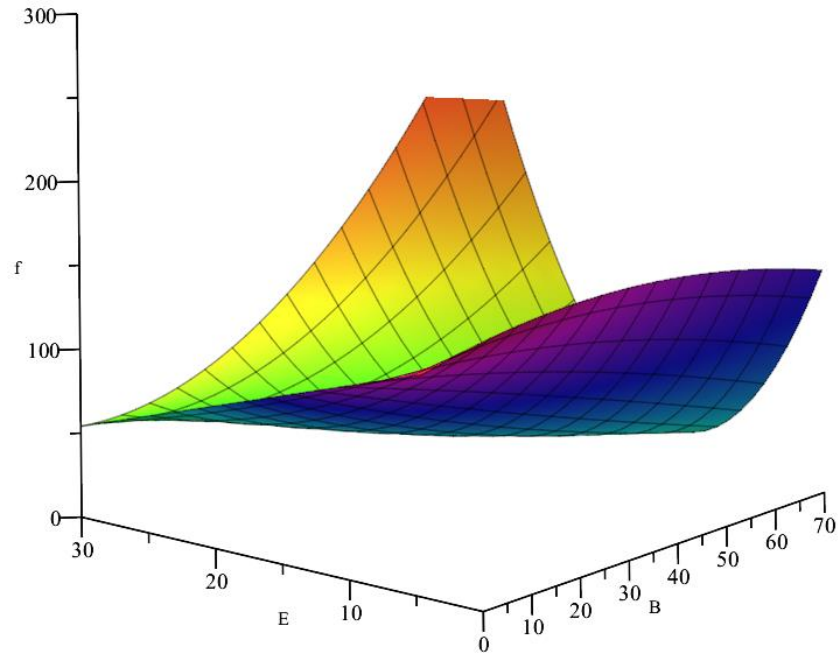


Рис. 4.2 – Сідлова точка з координатами $A = 21$, $K = 2$, $C = 77 - B - E$

Джерело: створено автором на основі розрахунків програмного забезпечення Maple.

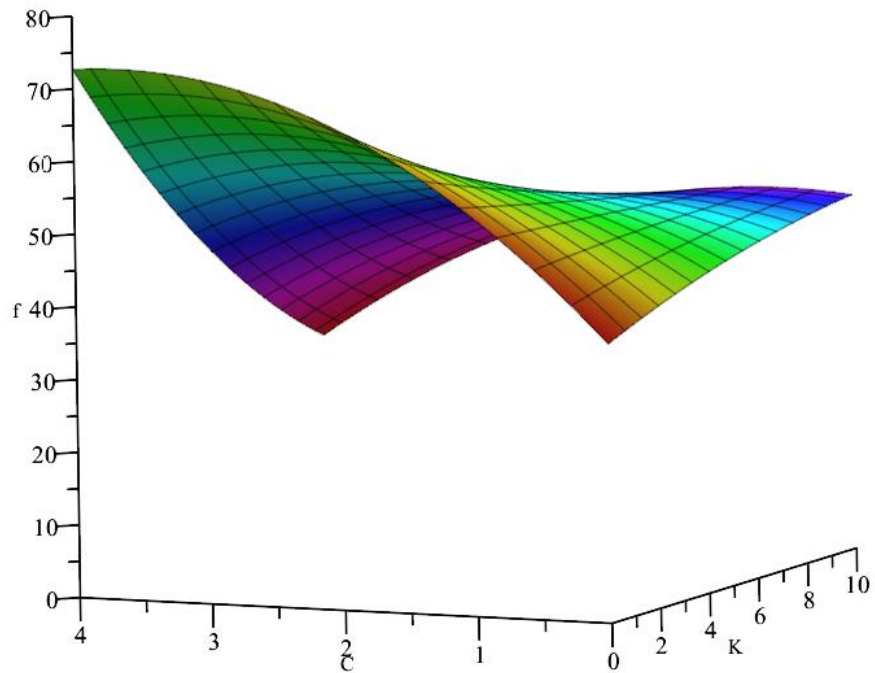


Рис. 4.3 – Сідлова точка з координатами $A = 21$, $E = 15$, $B = 64 - K - C$

Джерело: створено автором на основі розрахунків програмного забезпечення Maple.

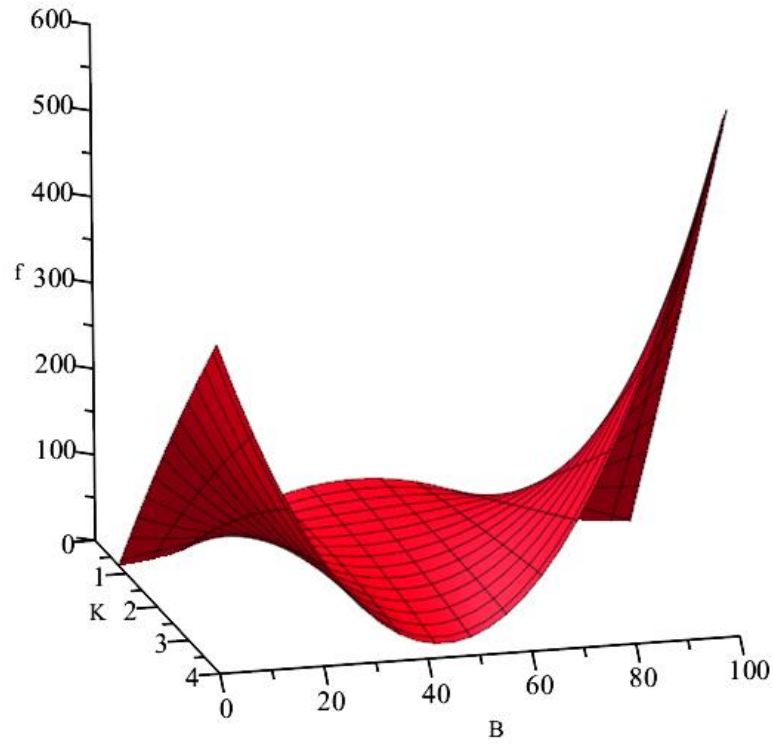


Рис. 4.4 – Сідлова точка з координатами $A = 21$, $E = 15$, $C = 64 - K - B$

Джерело: створено автором на основі розрахунків програмного забезпечення Maple.

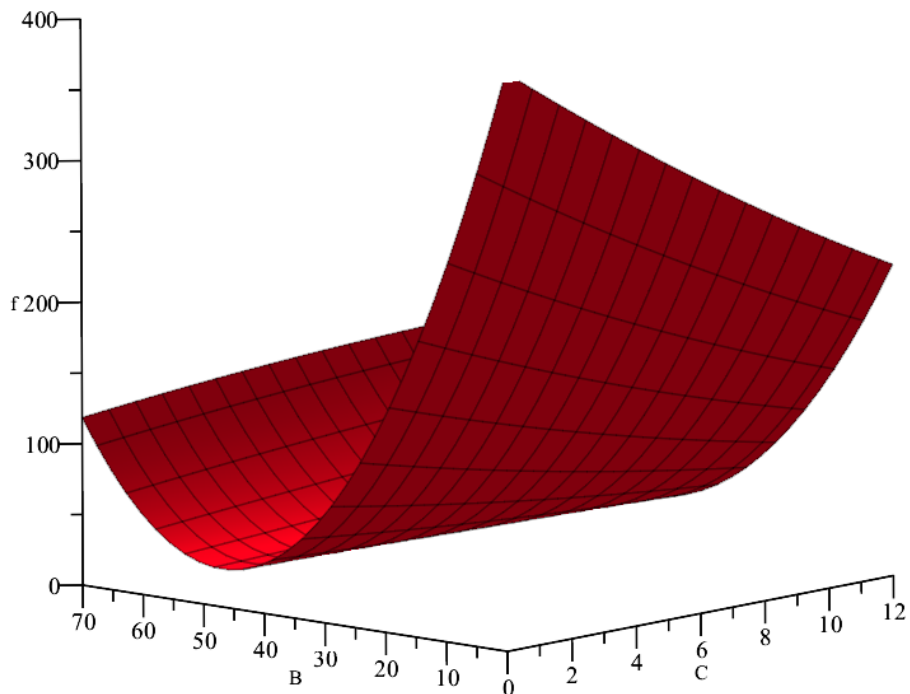


Рис. 4.5 – Сідлова точка з координатами $A = 21$, $K = 2$, $E = 77 - B - C$

Джерело: створено автором на основі розрахунків програмного забезпечення Maple.

4.2 Аналіз кількісно-якісного складу димових газів при спалюванні композиційних сумішей

Сучасні тенденції у сфері управління відходами стимулюють використання відходів як альтернативного виду палива, що зменшує навантаження на полігони та в певній мірі заміщує викопне паливо. Відповідно до матриці планування експерименту визначено відсотковий вміст компонентів для формування композиційних сумішей. Визначення теплоти згоряння сумішей проводилося згідно методики, що описано в п. 2.5 та 3.3 дисертаційної роботи.

Основною метою експериментального етапу роботи у формуванні композиційних сумішей є встановлення впливу співвідношення торфу родовищ Полтавщини та горючих фракцій побутових відходів на фізико-хімічні, енергетичні та екологічні характеристики композиційних паливних сумішей. Зокрема, дослідження спрямовано на визначення оптимальної структури суміші, яка забезпечує максимальну теплоту згоряння, прийнятну зольність, стабільні механічні властивості та мінімальні викиди шкідливих речовин під час спалювання. За допомогою гранулятора сформовано досліджувані зразки, для яких експериментальним шляхом визначено теплотвірну здатність (рис. 4.6).



Рис. 4.6 – Досліджувані зразки композиційних сумішей

Джерело: фото автора.

Досліджено, що композиційні суміші мають достатню калорійність (рис. 4.7).

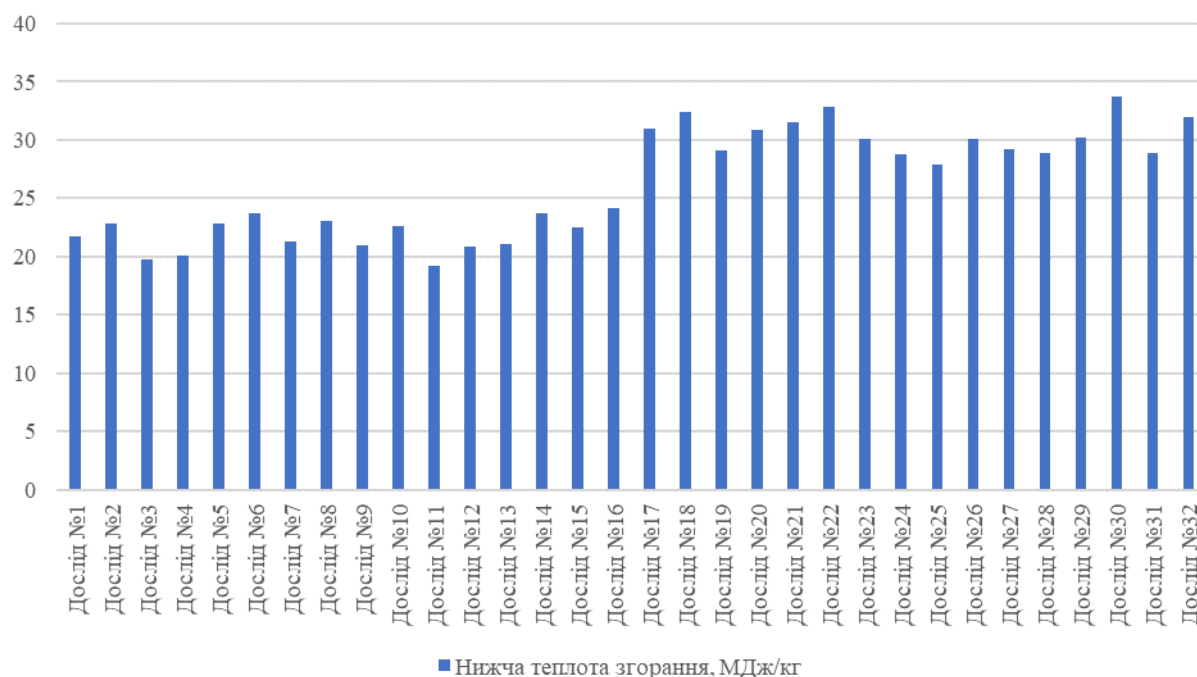


Рис. 4.7 – Нижча теплота згорання композиційних сумішей

Джерело: створено автором на основі даних табл. 4.4.

Встановлено залежність нижчої теплоти згорання від вмісту торфу, а також синтетичного текстилю, в композиційній суміші. Тобто, чим більший відсоток торфу та текстилю в суміші, тим менша теплотвірна здатність, що пояснюється значним вмістом неорганічних речовин у перелічених компонентів. Тому варто для подальших експериментальних досліджень відібрати найбільш оптимальні композиційні суміші з точки зору теплотехнічних характеристик.

Оскільки гіпотеза про адекватність моделі підтверджена критерієм Фішера, а отримане рівняння регресії 4.7 адекватно описує експеримент, доцільно дослідити якісний та кількісний склад димових газів під час спалювання композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів і торфу, оскільки це важливий аспект для оцінювання екологічних ризиків при застосуванні відходів як альтернативного виду палива та для вибору відповідних систем газоочищення димових газів.

Для визначення кількісного складу димових газів під спалювання здійснено експериментальне дослідження, яке проводилося на підприємстві ТОВ «Понори» Прилуцького району Чернігівської області із застосуванням універсального котла Alter DUO PLUS (рис. 4.8) (Додаток Е).



Рис. 4.8 – Твердопаливний котел Альтеп DUO PLUS

Джерело: фото автора.

Твердопаливний котел Альтеп DUO PLUS – котел з вбудованим контролером та вентилятором наддуву. Призначений для роботи у складі опалювальних систем житлових та промислових приміщень площею до 1500 м². Конвекційна частина котла є чотириходовим теплообмінником з розташованими безпосередньо над топкою водними полицями. Така конструкція дозволяє ефективно відбирати отримане при спалюванні палива тепло, внаслідок чого лише незначна його кількість викидається у повітря разом із димовими газами [175].

У нижній частині топки розташовані колосникові решітки, що омиваються водою, виконані з безшовних труб. Завдяки постійному охолодженню водою, що циркулює в них, колосники довго не прогорають і служать додатковою теплообмінною поверхнею [175].

Вимірювання концентрацій CO, NO, NO₂ та SO₂ проводилося за допомогою газоаналізатора OKSI 5M безпосередньо в димоході, в центрі його діаметру, застосовуючи вимірювальний зонд. Методика проведення дослідження описана в п. 2.6 Розділу 2 дисертаційного дослідження. Результати досліджень наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Усереднені результати концентрацій токсичних речовин

№ з/п	Вид палива ¹	Відсотковий вміст компонентів	Нижча теплота згорання, МДж/кг	Середня концентрація забруднювальних речовин ² , мг/м ³			
				CO	NO	NO ₂	SO ₂
1	Проба №1	35/56/6/4/15	31,478	5248,1	263,2	385,3	253,7
2	Проба №2	21/56/6/4/15	32,876	5606,7	121,4	181,2	374,3
3	Проба №3	35/40/6/4/15	30,115	4922,2	270,3	392,7	401,4
4	Проба №4	24/46/7/5/18	28,745	4108,3	342,1	403,6	362,1
5	Проба №5	31/49/5/2/13	30,253	6114,8	112,7	154,5	386,2
6	Проба №6	21/56/6/2/15	33,741	5471,4	203,6	364,3	276,5
7	Проба №7	36/41/6/2/15	28,932	4714,2	317,2	387,4	324,4
8	Проба №8	25/48/7/2/18	32,012	4263,6	334,4	377,1	385,6

Примітка:

¹ – папір і картон–пластик–текстиль–деревина–торф;

² – гранично допустимі концентрації (максимально-разові) хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць [161] для CO = 5,0 мг/м³, NO = 0,4 мг/м³, NO₂ = 0,2 мг/м³, SO₂ = 0,5 мг/м³.

Джерело: створено автором на основі власних експериментальних досліджень.

Відповідно до результатів експерименту на підприємстві ТОВ «Понори» встановлено, що включення торфу до складу композиційних сумішей суттєво впливає на екологічні аспекти процесу спалювання. Зокрема, зміна його частки дозволяє регулювати утворення монооксиду вуглецю. Для візуалізації отриманих

даних побудовано гістограму порівняння концентрацій забруднювальних речовин у випадку зростання концентрацій CO, що наведено на рис. 4.9.

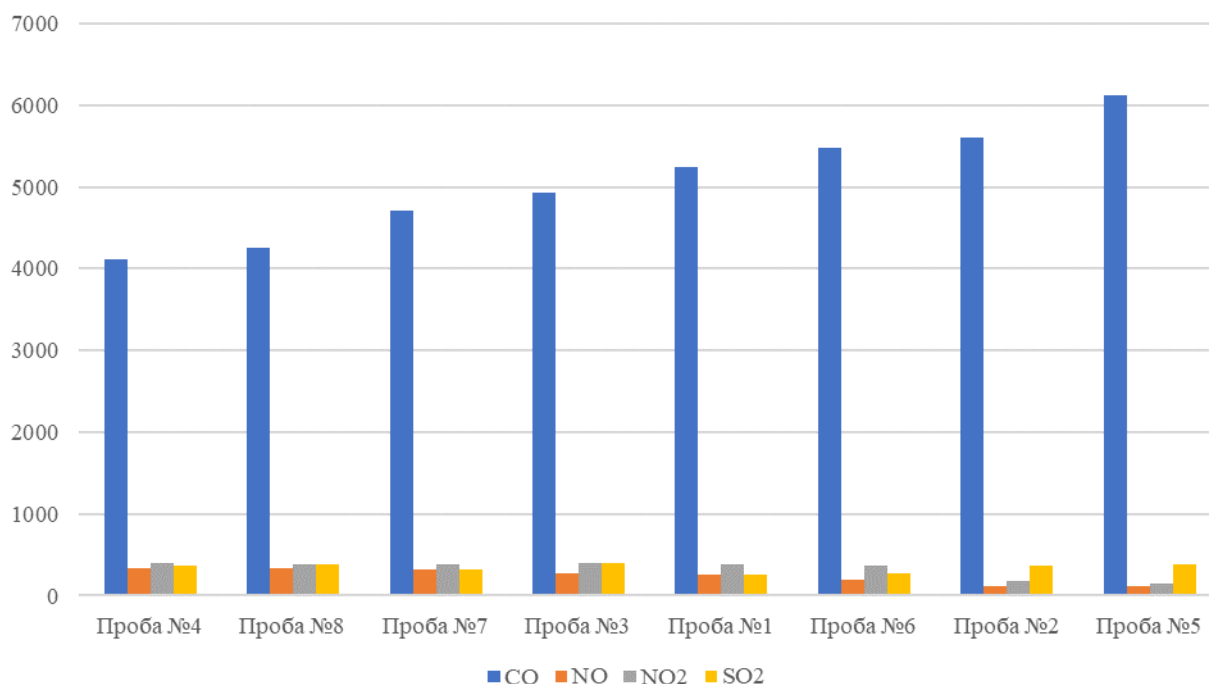


Рис. 4.9 – Порівняння концентрацій забруднювальних речовин від вмісту торфу в композиційних сумішах

Джерело: створено автором на основі даних табл. 4.5.

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що концентрації CO, NO, NO₂, SO₂ для всіх досліджуваних зразків перевищують нормативні значення. Це пояснюється ефектом неповного згоряння, коли бракує кисню в процесі горіння або недостатньо висока температура горіння. Крім того, в результаті експерименту була виявлена залежність: при збільшенні відсоткового вмісту торфу у суміші зменшується утворення концентрацій монооксиду вуглецю, але підвищується концентрація NO, NO₂ та SO₂. Таким чином, в результаті проведеного експериментального дослідження було встановлено: кількісний склад димових газів, що надходять в атмосферу в процесі спалювання композиційної суміші, суттєво залежить від співвідношення в суміші горючих фракцій побутових відходів й торфу, а також параметрів горіння та способу підготовки палива.

4.3 Обґрунтування вибору технології перероблення побутових відходів шляхом розроблення композиційних сумішей

Вибір технології перероблення побутових відходів шляхом розроблення композиційних сумішей сумісно з торфом обумовлений необхідністю підвищення рівня ресурсного використання відходів в регіоні, водночас зменшуючи обсяги їх захоронення та забезпечуючи енергетичну ефективність системи поводження з відходами. В умовах постійного накопичення побутових відходів традиційні методи поводження з ними, зокрема захоронення на полігонах, не забезпечують належного рівня екологічної безпеки та призводять до втрати значного ресурсного потенціалу [105, 129, 138].

Побутові відходи характеризуються складним морфологічним складом, високою неоднорідністю, змінною вологістю та різною теплотвірною здатністю, що ускладнює їх пряме використання як альтернативного палива. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є формування композиційних сумішей на основі побутових відходів із додаванням компонентів, які здатні покращувати паливні, теплотехнічні та екологічні характеристики кінцевого продукту. У цьому контексті доцільним є використання торфу як природного енергетичного матеріалу, що має розвинену пористу структуру, за рахунок чого виступає як адсорбент, та здатність регулювати вологість суміші [90, 104, 141, 149]. Також додавання торфу сприяє зниженню негативного впливу надлишкової вологості побутових відходів, підвищенню механічної міцності паливних гранул або брикетів та покращенню процесів термічного перероблення [89, 92].

Запропонована удосконалена технологія передбачає послідовне виконання ряду операцій, що забезпечують підготовку відходів до використання як паливного ресурсу. Загальна технологічна схема включає такі основні етапи: відбирання проб, сортування за фракціями, сушіння, подрібнення, сушіння подрібнених фракцій, формування сумішей та їх брикетування (рис. 4.10).

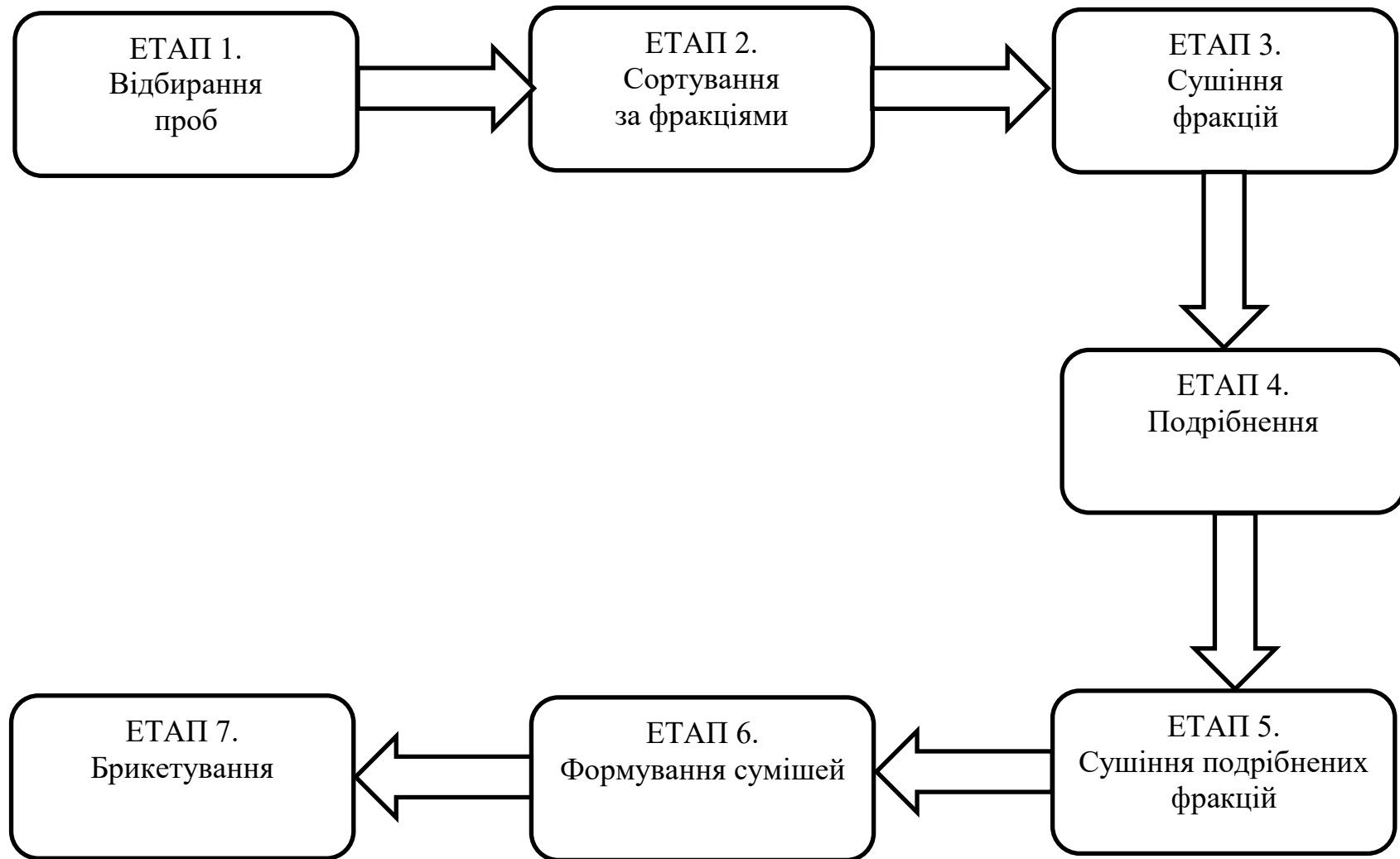


Рис. 4.10 – Блок-схема технології перероблення побутових відходів

Джерело: створено автором.

На першому етапі здійснюється відбирання проб з контейнерів чи сміттєзвалищ для зменшення навантаження на довкілля шляхом завантаження сміттєвозів.

Другий етап передбачає сортування відходів за ресурсоцінними для горіння фракціями: папір та картон, пластик, текстиль та деревина. Рекомендовано лінії для сортування побутових відходів від українського виробника KONSORT. Для міських територіальних громад доцільно застосувати лінію, потужністю обладнання, що переробляє до 150 000 тонн побутових відходів на рік. Застосовується на окремо збудованих заводах для подрібнення та сортування різноманітних відходів (рис. 4.11) [176].

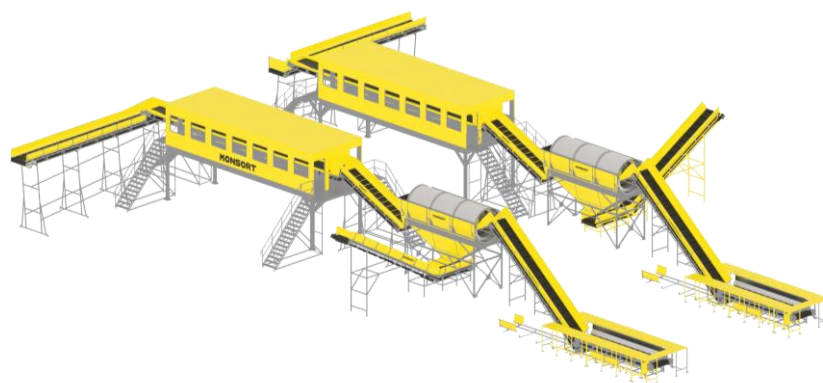


Рис. 4.11 – Сортувальна лінія потужністю до 150 000 тонн ПВ на рік
Джерело: [176].

На сміттєзвалищах або окремо збудованих заводах для подрібнення та сортування відходів доцільно застосовувати лінію для сортування побутових відходів до 50 000 тон в рік (рис. 4.12) [177].



Рис. 4.12 – Сортувальна лінія потужністю до 50 000 тонн ПВ на рік
Джерело: [177].

Для міського та селищного сортування відходів, на окремо збудованих заводах для подрібнення та сортування різноманітних відходів лінія для сортування відходів до 10 000 тонн в рік (рис. 4.13) [178].



Рис. 4.13 – Сортувальна лінія потужністю до 10 000 тонн ПВ на рік
Джерело: [178].

Для перероблення органічних відходів та для ручного сортування з виділенням ресурсоцінних компонентів у складі побутових відходів доцільно застосовувати мобільну лінію для сортування сміття (рис. 4.14) [179].

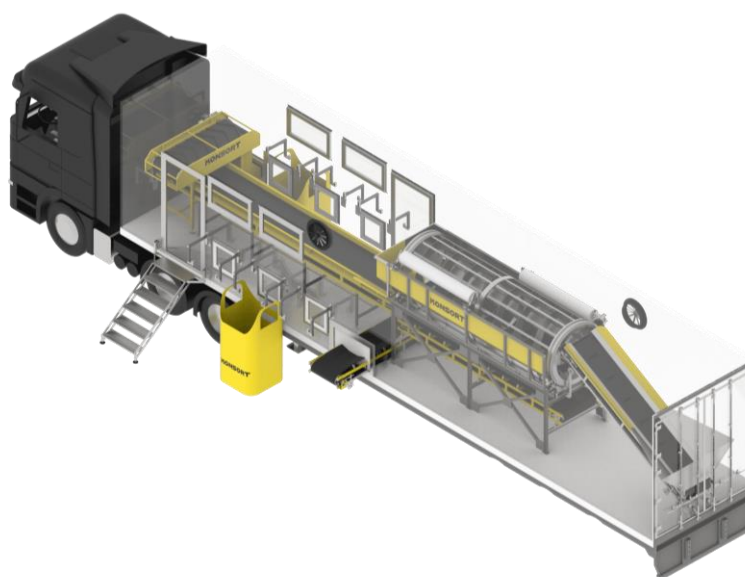


Рис. 4.14 – Мобільна лінія сортування відходів
Джерело: [178].

На третьому етапі відбувається сушіння відібраних фракцій. Четвертий етап – подрібнення горючої фракції відходів та торфу до однорідного розміру, що забезпечує покращення умов подальшої обробки. П'ятим етапом передбачено додаткове сушіння матеріалу до оптимальної вологості, що є необхідною умовою для ефективного горіння та формування якісного композиційного палива.

Шостий етап полягає у формуванні композиційних сумішей відповідно до рецептури, які мають найбільшу теплотвірну здатність, встановлену під час нашого дослідження шляхом математичного моделювання (табл. 4.6). Формування відбувається за рахунок переведення відсоткового вмісту рецептури на кг палива.

Таблиця 4.6

Рецептура палива

№ з/п	Рецептура, %	Склад відходів
1	35/56/6/4/15	папір і картон-пластик-текстиль-деревина-торф
2	21/56/6/4/15	папір і картон-пластик-текстиль-деревина-торф
3	35/40/6/4/15	папір і картон-пластик-текстиль-деревина-торф
4	24/46/7/5/18	папір і картон-пластик-текстиль-деревина-торф
5	31/49/5/2/13	папір і картон-пластик-текстиль-деревина-торф
6	21/56/6/2/15	папір і картон-пластик-текстиль-деревина-торф
7	36/41/6/2/15	папір і картон-пластик-текстиль-деревина-торф
8	25/48/7/2/18	папір і картон-пластик-текстиль-деревина-торф

Джерело: створено автором.

Введення торфу сприяє стабілізації процесу горіння, зниженню різких коливань теплотворної здатності та покращенню структури паливної суміші.

Заключним сьомим етапом є брикетування підготовленої суміші. У результаті цього процесу отримують паливні брикети, які характеризуються підвищеною щільністю, однорідністю та зручністю транспортування і зберігання. Отримане паливо може використовуватися як заміник традиційних видів палива для об'єктів інфраструктури. Таким чином, запропонована технологія забезпечує комплексне перероблення побутових відходів із максимальним використанням їх ресурсного потенціалу та мінімізацією негативного впливу на навколишнє середовище.

Для аналізу створено SWOT-аналіз, який демонструє переваги та наявні певні недоліки удосконаленої технології перероблення побутових відходів із розробленням композиційних сумішей (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

SWOT-аналіз

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
Зменшення екологічного навантаження на навколишнє природне середовище за рахунок зниження обсягів захоронення відходів на полігонах/сміттєзвалищах	Нестабільність морфологічного складу відходів у різні сезони року за певними видами фракцій
Зниження використання природних не відновлювальних видів палива	Необхідність попереднього сортування відходів
Застосування торфу в композиційних сумішах як адсорбенту для поглинання токсичних газів під час спалювання	Залежність композиційних сумішей від вологості та зольності певних компонентів палива
Отримання альтернативного виду палива зі значною теплотвірною здатністю	Потреба у спеціалізованому обладнанні для подрібнення та змішування
Досягнення цілей Сталого розвитку та виконання екологічних програм	Потреба в постійному контролі паливних характеристик сумішей
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
Залучення інвестицій у сферу управління відходами	Зростання вартості обладнання та експлуатаційних витрат
Підвищення енергетичної незалежності об'єктів інфраструктури регіону	Посилення екологічних вимог до спалювання відходів
Використання утвореної золи після спалювання композиційних сумішей для будівельних потреб	Висока конкуренція з іншими видами альтернативного палива, наприклад, деревні брикети
Створення нових робочих місць у сфері перероблення відходів	Конкуренція з іншими технологіями перероблення відходів (біогазові комплекси, піроліз, газифікація)
Забезпечення принципів циркулярної економіки в напрямі «енергія з відходів»	Можливі ризики забруднення довкілля при недотриманні технологічних режимів

Джерело: створено автором.

Проведення SWOT-аналізу удосконаленої технології перероблення побутових відходів із виготовленням композиційних паливних сумішей дозволяє систематизувати чинники, що впливають на її ефективність, оцінити перспективи практичного впровадження та визначити пріоритетні напрями підвищення

екологічної безпеки, енергетичної ефективності й економічної доцільності використання відходів як вторинного енергетичного ресурсу.

Важливою перевагою запропонованої технології є можливість залучення місцевих ресурсів і відходів територіальних громад до виробництва альтернативного палива. Такий підхід відповідає принципам циркулярної економіки, оскільки забезпечує повернення матеріальних та енергетичних ресурсів у господарський обіг замість їх остаточного видалення [52]. Крім того, виробництво композиційного палива сприяє скороченню споживання викопних палив, зменшенню викидів парникових газів та підвищенню енергетичної незалежності регіонів.

Запропонована технологія також узгоджується з цілями сталого розвитку, зокрема щодо забезпечення сталих моделей споживання і виробництва, розвитку екологічно безпечної інфраструктури та підвищення ефективності використання природних ресурсів. Використання композиційних сумішей на основі побутових відходів і торфу створює передумови для комплексного вирішення екологічних, економічних та енергетичних проблем, пов'язаних із поводженням з відходами.

Таким чином, вибір технології перероблення побутових відходів шляхом розроблення композиційних сумішей є науково та практично обґрунтованим рішенням, що дозволяє підвищити ресурсну цінність відходів, отримати якісне альтернативне паливо та забезпечити екологічно безпечне управління відходами на регіональному рівні.

4.4 Рекомендації щодо використання композиційних сумішей в теплогенеруючих установках малої потужності

Використання композиційних сумішей на основі побутових відходів і торфу в теплогенеруючих установках малої потужності потребує дотримання комплексу технічних, екологічних та експлуатаційних вимог, спрямованих на забезпечення ефективного й безпечного процесу виробництва теплової енергії.

Передусім доцільно використовувати композиційні суміші у вигляді брикетів або гранул зі стабільними фізико-хімічними характеристиками. Паливо повинно характеризуватися однорідним складом, контрольованою вологістю, достатньою механічною міцністю та високою теплотою згоряння, що забезпечить рівномірний процес горіння та зменшить ризик утворення надлишкових викидів забруднювальних речовин. Водночас отримані дані повинні враховуватися під час вибору режимів роботи котельного обладнання та розрахунку його продуктивності [89, 91, 92].

Для підвищення ефективності спалювання рекомендовано застосовувати композиційні суміші у котлах малої потужності, обладнаних автоматизованими системами подачі палива та регулювання процесу горіння. Такі системи дозволяють підтримувати оптимальний режим подачі повітря, підвищувати повноту згоряння палива та знижувати питомі витрати енергетичних ресурсів [94, 156].

Особливу увагу необхідно приділяти контролю вологості композиційних сумішей. Рекомендоване значення вологості палива не повинно перевищувати 15–20 %, оскільки її збільшення призводить до зниження теплотвірної здатності, погіршення стабільності горіння та зростання викидів монооксиду вуглецю.

Для забезпечення екологічної безпеки експлуатації теплогенеруючих установок необхідно проводити регулярний моніторинг складу димових газів. Особливо важливим є контроль концентрацій оксидів азоту, оксиду вуглецю, діоксиду сірки, пилу та інших продуктів згоряння. За необхідності установки мають оснащуватися системами очищення димових газів або високоефективними пиловловлювачами [163-165]. Також доцільно застосовувати контроль температурного режиму (підігрів повітря, рекуперація тепла та використання сучасних пальників дозволяють підтримувати необхідну температуру), каталітичне допалювання.

Рекомендується використовувати композиційні суміші насамперед для теплопостачання об'єктів комунальної та соціальної інфраструктури територіальних громад, зокрема закладів освіти, адміністративних будівель,

підприємств комунального господарства та невеликих виробничих об'єктів. Це дозволить частково замінити традиційні викопні види палива та зменшити витрати на енергозабезпечення [138, 139, 181].

Запровадження композиційних сумішей у теплогенеруючих установках малої потужності доцільно здійснювати в межах локальних енергетичних систем територіальних громад, де існує достатня сировинна база побутових відходів і торфу. Такий підхід сприятиме розвитку циркулярної економіки, підвищенню енергетичної незалежності регіонів та скороченню обсягів захоронення відходів [50-52].

Отже, використання композиційних сумішей на основі побутових відходів і торфу в теплогенеруючих установках малої потужності є перспективним напрямом ресурсозбереження та енергозаміщення за умови забезпечення стабільних паливних характеристик, дотримання екологічних вимог і належного технічного супроводу процесу експлуатації.

Висновки до розділу 4

1. Проведено дослідження енергетичного потенціалу композиційних сумішей, сформованих на основі горючих фракцій побутових відходів із додаванням торфу. Показано, що результати дослідження варіюються від 19,147 МДж/кг до 33,741 МДж/кг, що спричинено варіюванням складу сумішей, який суттєво впливає на її теплотехнічні характеристики.

2. Розроблено математичну модель підбору оптимальних композиційних сумішей, яка дозволяє визначити раціональне співвідношення складових з метою досягнення максимального енергетичного ефекту при мінімізації негативного впливу на довкілля. Одержано сідлові точки з координатами шляхом методу градієнтного підйому, які дають найбільші значення ефективності: $A = 21, K = 2, C = 77 - B - E, A = 21, E = 15, B = 64 - K - C, A = 21, E = 15, C = 64 - K - B, A = 21, K = 2, E = 77 - B - C$.

3. Дослідження складу продуктів горіння показало, що зміна частки торфу в суміші впливає на концентрації основних забруднюючих речовин, зокрема на

концентрації монооксиду вуглецю. Відповідно, концентрація CO з 6114,8 мг/м³ знизилася до 4108,3 мг/м³ за рахунок збільшення відсоткового вмісту торфу в суміші.

4. Обґрунтовано доцільність вибору технології перероблення побутових відходів шляхом розроблення композиційних сумішей за рахунок можливості залучення місцевих паливних ресурсів і побутових відходів територіальних громад до виробництва альтернативного палива.

5. На основі отриманих результатів запропоновано рекомендації щодо використання композиційних сумішей в теплогенеруючих установках малої потужності шляхом дотримання комплексу технічних, екологічних та експлуатаційних вимог, спрямованих на забезпечення ефективного й безпечного процесу виробництва теплової енергії: використання брикетів зі стабільними фізико-хімічними характеристиками, застосування котлів малої потужності, обладнаних автоматизованими системами подачі палива та регулювання процесу горіння, проведення регулярного моніторингу складу димових газів, оснащення системами очищення димових газів та/або високоефективними пиловловлювачами.

Результати проведених досліджень опубліковані у роботах [180-183].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішена конкретна науково-технічна задача щодо удосконалення технології перероблення горючої частини побутових відходів. Встановлено наступне:

1. Кількість утворених відходів за 2024 рік на території Полтавської області становить 42 888,1 тис. тонн, але недостатньо впроваджуються принципи циркулярної економіки, маємо низький рівень сортування та перероблення ресурсоцінних компонентів. Водночас світовий досвід демонструє ефективність інтегрованих підходів, що включають роздільний збір, механіко-біологічне оброблення та енергетичне використання відходів, що підтверджує доцільність впровадження подібних технологій на регіональному рівні.

2. Визначення морфологічного складу побутових відходів окремих населених пунктів Полтавської області засвідчило, що домінуючими компонентами є органічна фракція, папір і картон, пластик, текстиль, деревина. Оцінювання ресурсного потенціалу показало, що теплотвірна здатність компонентів відходів, придатних для енергетичного використання, коливається в діапазоні від 2,794 до 6,935 МДж/кг, що створює передумови для формування альтернативного палива на їх основі.

3. Дослідження показало, що теплова цінність відходів прямо пропорційна вмісту вуглецю у відходах і обернено пропорційна зольності і вологості. Встановлено, що текстиль (15,4%), папір глянцевиий (13,2%) й деревина (12,8% й 11,7%) мають вище значення вологості порівняно з пластиком (4,8% й 6,1%). Значення зольності коливається в межах від 0,8% (поліпропілен) до 17,1% (торф). Зола є індикатором ефективності спалювання того чи іншого компоненту побутових відходів.

4. На основі проведеного багатofакторного експерименту побудовано математичну модель та визначені раціональні варіанти складу композиційних сумішей за критерієм максимізації теплоти згоряння. Відсотковий склад сумішей наступний:

№№ варіантів сумішей	Склад композиційних сумішей, %				
	Папір і картон	Пластик	Текстиль	Деревина	Торф
1	24	46	7	5	18
2	25	48	7	2	18
3	36	41	6	2	15
4	35	40	6	4	15
5	35	56	6	4	15
6	21	56	6	4	15
7	21	56	6	4	15
8	31	49	5	2	13

5. Оцінювання складу димових газів у процесі спалювання раціональних композиційних сумішей показало, що при збільшенні частки торфу з 13 до 18% зменшується концентрація оксиду вуглецю з 6114,8 мг/м³ до 4108,3 мг/м³, але підвищується концентрація оксиду азоту з 112,7 мг/м³ до 342,1 мг/м³, діоксиду азоту з 154,5 мг/м³ до 403,6 мг/м³ та діоксиду сірки з 253,7 мг/м³ до 401,4 мг/м³.

6. У результаті виконаних досліджень обґрунтовано доцільність вибору технології перероблення побутових відходів шляхом розроблення композиційних сумішей за рахунок можливості залучення місцевих паливних ресурсів і побутових відходів територіальних громад для виробництва альтернативного палива. Розроблено методику та практичні рекомендації щодо створення та використання композиційних сумішей як палива в теплогенеруючій установці малої потужності. Практична значимість виконаних досліджень підтверджена можливістю впровадження технології перероблення горючих фракцій побутових відходів шляхом спалювання композиційних сумішей у твердопаливних котлах малої потужності типу Alter DUO PLUS.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Верховна Рада України. (2022). *Про управління відходами: Закон України № 2320-IX від 20 червня 2022 року*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20>.
2. Крот, О. П., Косенко, Н. О., Левашова, Ю. С., Строгіна, Т. С., & Лебедева, О. С. (2022). Аналіз екологічних технологій утилізації муніципальних відходів. *Екологічні науки №1(40)*, 110–114. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.20>.
3. Приходько, В. Ю., Сафранов, Т. А., & Шаніна, Т. П. (2019). Сучасний стан сфери управління та поводження з твердими побутовими відходами в Україні. *Man and Environment. Issues of Neocology*, 32. 58–66. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2019-32-05>.
4. Сафранов, Т., Данкевич, В., & Полушкін, Т. (2025). Особливості управління та поводження з відходами пластикових матеріалів на території Одеської області. *Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування»*, (1), 44–52. <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-1.05>
5. Mykhailenko, V., Shelinhovskyi, D., & Safranov, T. (2023). Management efficiency for certain types of plastic waste. *Environmental Problems*, 8(4), 225–230. <https://doi.org/10.23939/ep2023.04.224>
6. Пацева, І. Г., Герасимчук, О. Л., & Кагукіна, А. М. (2022). Системний підхід управління відходами об'єднаних територіальних громад. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*, 4(43), 181–184. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.30>
7. Пацева, І. Г., & Нонік, Л. Ю. (2024). Стратегічний аналіз передумов впровадження логістичних підходів у систему управління відходами на регіональному рівні. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*, 2(53), 77–83. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.11>

8. Demchuk, L., Patseva, I., Nonik, L., & Voynalovych, I. (2025). Logistics processes of destruction waste. *Environmental Problems*, 10(1), 13–19. <https://doi.org/10.23939/ep2025.01.013>

9. Петрук, В. Г., Іщенко, В. А., Петрук, Р. В. (2023). *Оптимізація системи інтегрованого управління твердими побутовими відходами у Вінницькій області*. Вінниця: ВНТУ.

10. Гапонич, Л. С., Голенко, І. Л., & Топал, О. І. (2019). Нормативне регулювання, сучасний стан поводження та перспективи енергетичного використання твердих побутових відходів в Україні. *The problems of general energy*, 3(58), 45–54. <https://doi.org/10.15407/pge2019.03.045>

11. Корінько І. В., Горох М. П., Вороненко В. О. *Екологізація технологій регенерування та утилізації відходів*. Харків: КП «ХВК», ХНУМГ.

12. Тітова, А. О., Харламова, О. В., Шмандій, В. М., Безденежних, Л. А., & Ригас, Т. Є. (2023). Управління та поводження з відходами споживання у воєнний час із застосуванням моделювання і прогнозування стану довкілля. У М. С. Мальований (ред.), *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг* (с. 120–131). Київ: Яроченко.

13. Тітова, А. О., Харламова, О. В., Безденежних, Л. А., & Бігдан, С. А. (2021). Оптимізація системи управління твердими побутовими відходами у Кременчуцькій територіальній громаді. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 3(128), 51–56.

14. Синящик, В. Ф., Харламова, О. В., Шмандій, В. М., Ригас, Т. Є., & Безденежних, Л. А. (2023). Екологічні аспекти сталого розвитку у системі поводження з пластиковими відходами. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, 1(27), 85–91.

15. Шмандій, В. М., Тітова, А. О., Харламова, О. В., & Ригас, Т. Є. (2022). Забезпечення екологічної безпеки шляхом утилізації відходів буріння. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, 1(25), 40–48. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-1\(25\)-42-48](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-1(25)-42-48).

16. Titova, A., Kharlamova, O., Shmandiy, V., Bezdeneznych, L., & Rigas, T. (2023). Modeling and forecasting of the state of the environment in the waste management system of Kremenchuk urban territorial community in wartime. *Environmental Problems*, 8(3), 178–184. <https://doi.org/10.23939/ep2023.03.178>.
17. Шмандій, В., Безденежних, Л., Харламова, О., Ригас, Т., & Мальований, М. (2024). Management of ecological safety by obtaining a sorbent from waste and using it for wastewater treatment. *Ecologia Balkanica*, 16(2), 96–102. <https://doi.org/10.69085/eb20242096>.
18. Корбут, М., Сафранов, Т., & Мальований, М. (2024). Методичні підходи до оцінки екологічних ризиків від полігонів твердих побутових відходів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337(3), 187–196. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-28>
19. Sawicka, B., Krochmal-Marczak, B., Vambol, S., & Vambol, V. (2023). Relevance of the problem of risks associated with waste accumulation. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження»* (с. 10–12). Полтава.
20. Толкованов, В. В., Ілляш, О. Є., Журавель, Т. В., & Голік, Ю. С. (2018). *Управління твердими побутовими відходами в умовах реформування місцевого самоврядування та розвитку міжмуніципального співробітництва*. Київ.
21. Ілляш, О. Є., & Голік, Ю. С. (2022). Організація моніторингу системи управління побутовими відходами. *Collection of Scientific Papers “SCIENTIA”* (pp. 48–51). Stockholm, Sweden.
22. Самойлік, М. С. (2014). Комплексна оцінка ефективності регіональних систем поводження з твердими відходами. *БІЗНЕСІНФОРМ*, 4, 220–225.
23. World Bank Group. (2018). *Municipal solid waste management: A roadmap for reform for policy makers*. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30434>
24. World Bank. (n.d.). *Trends in solid waste management*. <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends-in-solid-waste-management.html>

25. Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>.
26. Eurostat. (n.d.). *Recycling rate of municipal waste*. European Commission. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/sdg_11_60
27. Eurostat. (n.d.). *Municipal waste: General and regional statistics*. European Commission. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/med_en21
28. Krynychna, I. P., Hozhylo, I. I., & Kostenko, V. O. (2017). Improvement of public administration in the sphere of solid household waste management. *Аспекти публічного управління*, 5(5–6), 35–43.
29. Environment–People–Law. (n.d.). Аналіз законодавства щодо управління відходами будівництва, руйнації США. Рекомендації щодо змін в законодавстві України. <https://epl.org.ua/announces/analiz-zakonodavstva-shhodo-upravlinnya-vidhodamy-budivnytstva-rujnatsiyi-ssha-rekomendatsiyi-shhodo-zmin-v-zakonodavstvi-ukrayiny/>.
30. Vpered. (n.d.). Як сортують сміття в інших країнах. <https://vpered.od.ua/rajon/yak-sortuyut-smittya-v-inshix-kra%D1%97nax/>
31. Zhang, Y., & Wang, L. (2020). Energy recovery from waste in East Asia: A comparative study of technological advances. *Waste-to-Energy Journal*, 33(1), 99–108.
32. Трофімов, І. Л., Яковлева, А. В., Іванченко, О. В., & Верягіна, Л. С. (2016). Аналіз потенціалу твердих побутових відходів як сировини для виробництва альтернативних палив в Україні. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2(44), 105–111.
33. Дрозд, І. П., & Скляренко, В. І. (n.d.). Огляд методів утилізування твердих побутових відходів. <http://waste.com.ua/cooperation/2008/theses/drozd.html>.
34. Душкін, С. С., & Дегтяр, М. В. (2011). *Технологія утилізації твердих побутових відходів*. Харків: ХНАМГ.
35. Навроцький, Р. Л. (2016). Досвід країн Європейського Союзу в сфері безпечного поводження з твердими побутовими відходами. *Економіка та суспільство*, 7, 621–625.

36. Войціховська, А., Кравченко, О., Мелень-Забрамна, О., & Панькевич, М. (2019). *Кращі європейські практики управління відходами*. Львів: Компанія «Манускрипт».
37. Avfall Sverige. (n.d.). *Swedish waste management*. <https://www.avfallsverige.se/in-english/swedish-waste-management/>.
38. Müller, T., & Schreiber, H. (2022). Comparative analysis of waste treatment infrastructure in European and Asian countries. *Environmental Studies Quarterly*, 50(3), 207–215.
39. Попова, Ю. М., Свистун, Л. А., & Панасенко, Д. І. (2019). Публічне управління твердими побутовими відходами: іноземний досвід. *Modern Economics*, 15
40. Нижниченко, Я. Є. (2024). Світові тенденції управління відходами та аналіз ситуації в Україні. *Підприємництво, торгівля та біржова діяльність*, 1–23. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14187042>
41. European Parliament & Council of the European Union. (2008). *Directive 2008/98/EC on waste*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08#Text.
42. Сокіран, М. В. (2018). Державне управління у сфері поводження з відходами. *Науковий вісник Херсонського державного університету*, 3, 82–85.
43. Хруник, С., Саницький, М., & Чернер, К. (2008). Екологічна безпека термічної утилізації відходів як альтернативного палива в цементній промисловості. *Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економії енергії»* (с. 364–368). Львів.
44. Council of the European Union. (1999). *Council Directive 1999/31/EC on the landfill of waste*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_925#Text.
45. European Parliament & Council of the European Union. (2006). *Directive 2006/21/EC on the management of waste from extractive industries*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_016-06#Text.
46. European Parliament & Council of the European Union. (2004). *Directive 2004/35/EC on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_965#Text.

47. European Parliament & Council of the European Union. (1994). *Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_b05#Text.

48. European Parliament & Council of the European Union. (2012). *Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_030-12#Text.

49. European Parliament & Council of the European Union. (2006). *Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_020-06#Text.

50. Чичуліна, К. В., Скриль, В. В., Чорновол, Н. С., Горбунова, М. Р., & Ткаченко, А. О. (2022). Кластерна модель управління відходами на основі європейської концепції «циркуляційної економіки». *Ефективна економіка*, 11, 1–21. <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2022.11.38>.

51. European Commission. (n.d.). *Circular economy*. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en

52. Lysenko, A., & Holovin, I. (2023). Circular economy in waste management: Innovations and European integration. *Екологічний вісник України*, 5(3), 58–67.

53. Marshall, R. E., & Farahbakhsh, K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste Management*, 33(4).

54. Верховна Рада України. (2005). *Про стан виконання законодавства у сфері поводження з відходами в Україні та шляхи його вдосконалення: Постанова Верховної Ради України № 2967-IV*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2967-IV#Text>.

55. Кабінет Міністрів України. (2017). *Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року: Розпорядження № 820-р*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80>.

56. Верховна Рада України. (1991). *Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України № 1264-XII*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>.

57. Верховна Рада України. (2017). *Про оцінку впливу на довкілля: Закон України № 2059-VIII*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text>.

58. Верховна Рада України. (2018). *Про стратегічну екологічну оцінку: Закон України № 2354-VIII*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2354-19#Text>.

59. Кабінет Міністрів України. (2024). *Про затвердження Національного плану управління відходами до 2033 року: Розпорядження № 1353-р*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1353-2024-%D1%80#Text>.

60. Міністерство розвитку громад та територій України. (n.d.). *Управління побутовими відходами*. <https://mindev.gov.ua/diialnist/napriamy/sfera-komunalnykh-posluh/upravlinnia-pobutovymy-vidkhodamy>.

61. Державна служба статистики України. (n.d.). *Утворення та оброблення відходів*. <https://stat.gov.ua/uk/datasets/utvorenniya-ta-obroblennya-vidkhodiv>.

62. Верховна Рада України. (2019). *Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України № 2697-VIII*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19>.

63. Полтавська обласна державна адміністрація. (2022). *Комплексна програма поводження з твердими побутовими відходами у Полтавській області на 2022–2030 роки*. <https://www.adm-pl.gov.ua/advert/opriyudnennya-dlya-obgovorenniya-proektu>.

64. GFA Consulting Group, & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2016). *Субрегіональна стратегія поводження з твердими побутовими відходами для Полтавської області*.

65. Полтавська обласна військова адміністрація. (2024). *Регіональний план управління відходами у Полтавській області до 2033 року*. https://media.poda.gov.ua/docs/m55pq3ql/proect_rp26112024.pdf.

66. Полтавська обласна державна адміністрація. (2021). *Стратегія розвитку Полтавської області на 2021–2027 роки*. <https://www.adm-pl.gov.ua/page/strategiya-rozvitku-poltavskoyi-oblasti-do-2027-roku>.

67. Кабінет Міністрів України. (2024). *Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з*

його виконання: Розпорядження № 761-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#n381>.

68. Верховна Рада України. (2000). *Про альтернативні види палива: Закон України № 1391-XIV*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14#Text>.

69. Петрова, Ж. О., Пазюк, В. М., Новікова, Ю. П., & Петров, А. І. (2022). Дослідження з переробки торфу на композиційне паливо. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* (с. 93–103).

70. Кудря, С. О. (ред.). (2020). *Відновлювані джерела енергії*. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України.

71. GeoGroup. (2024). *Видобуток торфу в Україні: доцільність відновлення торфовищ*. <https://geogroup.com.ua/blog/vydobutok-torfu-v-ukrayini-doczilnist-vidnovlennya-torfovyyshh/>.

72. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. (2012). *Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України*.

73. Веремеєнко, С. І. (2017). Перспективи використання торфу для відтворення родючості ґрунтів. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*, 1(1), 21–29.

74. *Торфово-земельний ресурс Північно-Західного регіону України*. (2017). Рівне: НУВГП.

75. Гнеушев, В. О. (2021). Розробка торфових родовищ: екологічний аспект. *Геотехнології*, 4, 1–5.

76. Вдовиченко, А. І., & Чернієнко, Н. М. (2018). Альтернативні джерела енергії: наслідки законодавчих прогалин. *Нафта і газ. Наука–Освіта–Виробництво* (с. 29–34).

77. Ярошовець, К. А., & Вдовиченко, А. І. (2021). Торф'яний потенціал у вирішенні соціально-економічних та екологічних проблем. У *Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування* (с. 248–254).

78. Ярошовець-Баранова, К. А., & Вдовиченко, А. І. (2022). Торф як альтернативне джерело енергії. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2(51), 136–141. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-136-141>.
79. Саранчук, В. І., Ільяшов, М. О., Ошовський, В. В., & Білецький, В. С. (2008). *Основи хімії і фізики горючих копалин*. Донецьк: Східний видавничий дім.
80. Снежкін, Ю. Ф., & Корінчук, Д. М. (2022). Торф – ефективний альтернативний вид палива. *Теплофізика та теплоенергетика*, 44(3), 5–15.
81. Стріха, В. А., Жуков, С. О., & Соболевський, Р. В. (2018). Аналіз сучасного стану та технологічного потенціалу покладів торфу Рівненської області. *Вісник ЖДТУ*, 1(81), 281–286. [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-281-286](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-281-286).
82. Abis, M., et al. (2020). Assessment of the synergy between recycling and thermal treatments in municipal solid waste management in Europe. *Energies*, 13(23), Article 6412. <https://doi.org/10.3390/en13236412>.
83. Kaur, A., Bharti, R., & Sharma, R. (2021). Municipal solid waste as a source of energy. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.286>.
84. Unegg, M. C., et al. (2023). Assessing the environmental impact of waste management: A comparative study of CO₂ emissions with a focus on recycling and incineration. *Journal of Cleaner Production*, Article 137745. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137745>.
85. Hamidinasab, B., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2025). Systematic review on environmental impact assessment of incineration technologies. *Energy Conversion and Management: X*, 26, Article 101039. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101039>.
86. Кобзар, С. Г., Топал, О. І., Гапонич, Л. С., & Голенко, І. Л. (2020). Моделювання процесу сумісного спалювання природного газу з паливами із твердих побутових відходів. *Electronic Modeling*, 42(6), 72–90. <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.072>.
87. Магера, Ю. М. (2017). Визначення умов, що дозволяють проводити спалювання низькокалорійного ТПВ без використання додаткового палива.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, 31(1253), 122–127.

88. Чупа, В. М. (2024). *Удосконалення методів та технологій переробки відходів для відновлювальної енергії (на прикладі Івано-Франківської області)* (дисертація доктора філософії, спеціальність 101 «Екологія»). Івано-Франківськ.

89. Корінчук, Д. М. (2010). *Розробка композиційного палива на основі торфу і рослинної біомаси для використання в теплоенергетичних установках* (автореферат дисертації кандидата технічних наук). Київ.

90. Коніщук, В. В., Шумигай, І. В., Душко, П. М., & Мартиненко, В. В. (2024). Моніторинг сучасного стану торфовищ Західного Полісся. *Збалансоване природокористування*, 3, 53–62. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2024.314923>.

91. Березюк, О. В. (2019). Експериментальне визначення компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттєвозі з урахуванням їхньої відносної вологості. *Наукові праці ВНТУ*, 4, 1–8. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2019-4-43-49>.

92. Корінчевська, Т., Михайлик, В., & Снежкін, Ю. (2023). Термічні характеристики палива з твердих побутових відходів. *Scientific Works*, 87(1), 13–19. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2685>

93. Голік, Ю. С., & Серга, Т. М. (2022). Регіональний підтекст використання твердих побутових відходів у якості енергетичного палива для котельних установок. *Environment Recovery and Reconstruction: War Context 2022* (с. 38–39). Полтава.

94. Голік, Ю. С., & Серга, Т. М. (2022). Інсинерація твердих побутових відходів як процес отримання палива. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження»* (с. 67–69). Полтава.

95. Голік, Ю. С., Ілляш, О. Є., Серга, Т. М., Пасічко, В. С., & Бородавка, В. В. (2022). Використання твердих побутових відходів у якості палива в м. Полтава. *Сучасні рецепції світоглядно-ціннісних орієнтирів Григорія Сковороди* (с. 96–98). Полтава.

96. Голік, Ю. С., Крот, О. П., & Серга, Т. М. (2022). Тверді побутові відходи як резерв енергетичного потенціалу міста Полтава. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження – 2022* (с. 37–47).

97. Голік, Ю. С., & Серга, Т. М. (2023). Перспектива використання твердих побутових відходів як енергетичного ресурсу в Полтавській області. *Екологічні проблеми сучасності* (с. 58–62). Луцьк.

98. Голік, Ю. С., Чепурко, Ю. В., & Серга, Т. М. (2023). Перспективи використання альтернативних видів палива на території Полтавської області України. *Стратегія якості в промисловості і освіті* (с. 64–68). Варна, Болгарія.

99. Голік, Ю. С., Шарий, Г. І., Крот, О. П., Чепурко, Ю. В., & Серга, Т. М. (2023). Дослідження використання альтернативних видів палива на Полтавщині. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, 66, 64–69.

100. Голік, Ю. С., Ілляш, О. Є., Крот, О. П., Чепурко, Ю. В., & Серга, Т. М. (2023). Дослідження пошуку нових альтернативних палив на Полтавщині. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи* (с. 133–135). Полтава.

101. Серга, Т. М., & Голік, Ю. С. (2024). Зв'язок науки та виробництва – шлях вирішення проблематики побутових відходів Полтавського регіону. *Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології* (с. 184–188). Хмельницький.

102. Holik, Y., Krot, O., Chernetska, I., Chepurko, Y., & Serha, T. (2025). Comprehensive assessment of the energy potential of biomass and municipal wastes in the Poltava region. *AIP Conference Proceedings*, 3238(1), Article 070002. <https://doi.org/10.1063/5.0248956>.

103. Серга, Т. М., & Голік, Ю. С. (2025). Аналіз сучасних практик управління побутовими відходами. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, 2, 403–410. [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).52](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).52).

104. Голік, Ю. С., & Серга, Т. М. (2025). Застосування торфу з родовищ Полтавщини як компоненту композиційного палива на основі горючих фракцій побутових відходів. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*, 4, 19–23.

105. Іваннікова, Н. А. (2015). Дослідження ресурсного потенціалу підприємства житлово-комунального господарства. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*, 3, 154–158.

106. Вінницька обласна державна адміністрація (n.d.). *Регіональний план управління відходами у Вінницькій області до 2030 року*. <https://www.vin.gov.ua/upr-ter/33784-rehionalnyi-plan-upravlinnia-vidkhodamy-u-vinnytskii-oblasti-2>.

107. Чернігівська міська рада. (2014). *Схема санітарного очищення м. Чернігів*. <https://chernigiv-rada.gov.ua/files/fayli/VK/Dodatok%201.pdf>.

108. Дніпропетровська обласна рада (n.d.). *Регіональний план управління відходами у Дніпропетровській області до 2030 року*. https://dniprorada.gov.ua/upload/editor/regionalnij_plan_upravlinnya_vidhodami_u_dni_propetrovskij_oblasti_do_2030_roku-_stisla_versiya.pdf

109. Хмельницька обласна державна адміністрація. (2020). *Проект «Регіональний план управління відходами у Хмельницькій області до 2030 року»*. <https://www.adm-km.gov.ua/wp-content/uploads/2020.pdf>

110. ГО «Еколтава». (2022). *Дослідження нових впливів пандемії COVID-19 на генерування твердих побутових відходів*. <https://www.ekoltava.org/zrealizovani-proyekty>

111. Коцюба, І. Г. (2017). Дослідження морфологічного складу твердих побутових відходів міста Житомира. *Екологічні науки*, 3–4(18–19), 19–23.

112. Міністерство з питань житлово-комунального господарства України. (2010). *Про затвердження Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів: Наказ № 39*. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0039662-10#Text>.

113. Інститут розвитку територіальних громад Полтавщини. (2022). *Аналітичні матеріали щодо стану експлуатації сміттєзвалищ на території Чорнухинської територіальної громади*. Полтава.

114. Інститут розвитку територіальних громад Полтавщини. (2022). *Аналітичні матеріали щодо стану експлуатації сміттєзвалищ на території Пирятинської територіальної громади*. Полтава.

115. Інститут розвитку територіальних громад Полтавщини. (2022). *Аналітичні матеріали щодо стану експлуатації сміттєзвалищ на території Гребінківської територіальної громади*. Полтава.

116. Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». (2019). *Схема санітарної очистки для м. Лохвиця та сіл Криниця, Васильки, Христанівка та Гаївщина Полтавської області*. Полтава.

117. Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». (2023). *Схема санітарного очищення для смт Опішня, с. Попівка та с. Малі Будища Опішнянської територіальної громади*. Полтава.

118. Інститут розвитку територіальних громад Полтавщини. (2022). *Аналітичні матеріали щодо стану експлуатації сміттєзвалищ на території Новооржицької територіальної громади*. Полтава.

119. Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». (2019). *Схема санітарної очистки смт Семенівка Полтавської області*. Полтава.

120. Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». (2023). *Схема санітарного очищення населених пунктів Котелевської селищної територіальної громади*. Полтава.

121. Полтавська обласна державна адміністрація. (2022). *Комплексна програма поводження з твердими побутовими відходами у Полтавській області на 2022–2030 роки*. Полтава. <https://www.adm-pl.gov.ua/advert/opriyudnennya-dlya-obgovorennya-proektu>

122. Науково-технічний центр Полтавського відділення Інженерної академії України. (2018). *Звітні матеріали за результатами проведених робіт з*

розрахунку норм утворення та визначення морфологічного складу твердих побутових відходів для м. Хорол Полтавської області. Полтава.

123. Насіров, М. Ф. (2018). Діагностика ресурсозабезпечення як визначального фактору прийняття рішення щодо реалізації екопроєкту з ресайклінгу відходів пластику. *Економічна наука*, 16, 61–66.

124. Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». (2024). *Остаточний звіт про результати виконання науково-дослідної роботи «Дослідження складу твердих побутових відходів та їх ресурсного потенціалу»*. <https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/main/struct/nning/kaf-pep/uap/zvit-poltavska-politekhnika-po-nakazu-mon-dod.7---12.12.24.pdf>.

125. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. (2024). *Про затвердження Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу побутових відходів: Наказ № 409*. <https://mtu.gov.ua/documents/2485.html>.

126. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2021). *Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen*. Vienna.

127. City of Vienna. (n.d.). *Methodology for the Analysis of Solid Waste (SWA-Tool)*. <https://www.wien.gv.at/meu/fdb/pdf/swa-tool-759-ma48.pdf>.

128. Сафранов, Т. А., Приходько, В. Ю., & Яновський, Д. Ю. (2023). Ресурсний потенціал потоку твердих побутових відходів Одеської області. *Український гідрометеорологічний журнал*, 32, 144–155.

129. Фролов, В. Ф., Степова, О. В., & Кутний, Б. А. (2025). Аналіз ресурсного потенціалу побутових відходів на прикладі Полтавської області. *Екологічні науки*, 5(62, ч. 2), 160–164. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.2.26>.

130. Department for Environment, Food and Rural Affairs. (n.d.). *Energy recovery for residual waste: A carbon-based modelling approach*. http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=11918_WR1910EnergyrecoveryforresidualwasteAcarbonbasedmodellingapporach.pdf.

131. World Bank. (n.d.). *Incineration and waste-to-energy technologies*. http://www.worldbank.org/urban/solid_wm/erm/CWG%20folder/Incineration-DMG.pdf.

132. International Solid Waste Association. (n.d.). *ISWA publications and technical resources*. <https://www.iswa.org>.

133. Таврійський державний агротехнологічний університет. (n.d.). *Методи теоретичних і експериментальних досліджень*. https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_12/page9.html.

134. Ганошенко, О. М., & Рассоха, І. В. (n.d.). Розроблення математичної моделі промивання паперової складової відпрацьованих автомобільних масляних фільтрів (с. 238–241).

135. Національний орган стандартизації України. (2021). *ДСТУ CEN/TS 15414-1:2021. Тверде відновлювальне паливо. Визначення вмісту вологи висушуванням. Частина 1. Загальна волога*. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=96976.

136. Національний орган стандартизації України. (2021). *ДСТУ EN ISO 21656:2021. Тверде відновлювальне паливо. Визначення вмісту золи*. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96978.

137. Національний орган стандартизації України. (2006). *DSTU ISO 1928:2006. Solid mineral fuels. Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method, and calculation of net calorific value*. http://document.ua/paliva-tverdi-mineralni_viznachennja-naivishoyi-teploti-zgo-nor15093.html.

138. Голік, Ю. С., Ілляш, О. Є., Монастирський, О. М., Чепурко, Ю. В., & Серга, Т. М. (2023). Оцінка енергоресурсного потенціалу територіальних громад Полтавської області як складової енергетичної безпеки. *Scientific Research in the Modern World* (с. 205–215). Toronto: Perfect Publishing.

139. Голік, Ю. С., Ілляш, О. Є., Чепурко, Ю. В., & Серга, Т. М. (2023). Етапи організації системи управління побутовими відходами. *Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України* (с. 217–220). Харків.

140. Ілляш, О. Є., Голік, Ю. С., Allesch, А., Чепурко, Ю. В., & Серга, Т. М. (2023). Analysis of studies on the morphological composition of domestic waste in Ukraine. *Environmental Problems*, 8(4), 241–246.

141. Ілляш, О. Е., Голік, Ю. С., Чепурко, Ю. В., & Серга, Т. М. (2023). Аналіз компонентного складу побутових відходів різних міст України. М. С. Мальований (ред.), *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг* (с. 106–119). Київ: Яроченко.
142. Ілляш, О. Е., Серга, Т. М., Бредун, В. І., & Чепурко, Ю. В. (2023). Дослідження морфологічного складу побутових відходів селища Котельва Полтавського району Полтавської області. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження* (с. 58–60). Полтава.
143. Голік, Ю. С., Ілляш, О. Е., Чепурко, Ю. В., & Серга, Т. М. (2023). Аналіз морфологічного складу побутових відходів окремих міст України. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження* (с. 143–146). Полтава.
144. Ілляш, О. Е., Чепурко, Ю. В., Серга, Т. М., Бредун, В. І., & Смоляр, Н. О. (2024). Дослідження компонентного складу твердих побутових відходів. О. Е. Ілляш (ред.), *Екологія. Довкілля. Енергозбереження – 2024* (с. 113–138). Полтава.
145. Ілляш, О. Е., Серга, Т. М., Бредун, В. І., Чепурко, Ю. В., & Максюта, Н. С. (2024). Порівняльний аналіз методологічних підходів до проведення сортувальних аналізів побутових відходів в Україні та Австрії. *Екологічні науки*, 55, 181–186.
146. Серга, Т. М. (2024). Аналіз результатів досліджень компонентного складу побутових відходів для населених пунктів селищного й сільського типу Полтавської області. *Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики* (с. 387–388). Полтава.
147. Серга, Т. М., & Голік, Ю. С. (2024). Зв'язок науки та виробництва – шлях вирішення проблематики побутових відходів Полтавського регіону. *Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології* (с. 184–188). Хмельницький.
148. Ilyash, O., Serha, T., Allesch, A., Bredun, V., Chepurko, I., & Maksyuta, N. (2024). Comparative analysis of the study results on the component composition of municipal waste in settlements of township and village type in the Poltava region. *Environmental Problems*, 9(4), 254–261.

149. Ілляш, О. Е., Серга, Т. М., Бредун, В. І., & Чепурко, Ю. В. (2024). Узагальнені результати чотирьох етапів дослідження морфологічного складу побутових відходів селища Котельва Полтавської області. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи* (с. 211–214). Полтава.

150. Ілляш, О. Е., Серга, Т. М., Бредун, В. І., & Чепурко, Ю. В. (2024). Визначення ресурсного потенціалу побутових відходів. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження»* (с. 77–80). Полтава.

151. Голік, Ю. С., & Серга, Т. М. (2024). Ресурсний потенціал побутових відходів. *Екологічні науки*, 57, 166–171.

152. Ілляш, О. Е., Бредун, В. І., & Серга, Т. М. (2025). Комплексний методологічний підхід щодо визначення морфологічного складу. О. Е. Ілляш (ред.), *Екологія. Довкілля. Енергозбереження – 2025* (с. 113–134). Полтава.

153. Sergiienko, L., Homlia, L., Chichulina, K., Chukhnii, O., & Mukhin, O. (2025). Lasting growth of cities: Challenges of infrastructure rehabilitation in Ukraine.

154. Верховна рада України. (2019). *Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року: Указ Президента України № 722/2019*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text>

155. Чичуліна, К. В. (2025). Ринок енергоефективності України на прикладі ТОВ «ЕСКО-Полтава». *Наукові перспективи*, 7(61), 741–752. [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-7\(61\)-741-752](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-7(61)-741-752)

156. Голік, Ю. С., Кутний, Б. А., Гузик, Д. В., Чернецька, І. В., Чепурко, Ю. В., Серга, Т. М., Манейло, Є. М., Михайлюк, С. М., & Грікіс, С. А. (2023). Нові лабораторні стенди кафедр теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики й прикладної екології та природокористування. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження* (с. 218–222). Полтава.

157. Mykhailovska, O., & Zotsenko, M. (n.d.). Utilization of drilling waste when drilling wells in the fields of the Western oil and gas region of Ukraine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*

158. Zotsenko, M., Mykhailovska, O., Shirinzade, I., & Lartseva, I. (2022). Influence of fly ash additives on strength characteristics of soil–cement as a material for waste storage construction. *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 181, pp. 457–464). Springer.

159. Mykhailovska, O., & Zotsenko, M. (2022). Drilling waste disposal technology using soil cement screens. *Key Engineering Materials*, 925, 211–220.

160. Колієнко, А. Г. (2024). *Конспект лекцій з дисципліни «Паливо і теорія горіння» для студентів спеціальності «Теплоенергетика»*. Полтава: НУПП

161. Міністерство охорони здоров'я України. (2024). *Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць: Наказ № 813*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0763-24#n19>.

162. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2025). *Деякі питання експлуатації установок спалювання відходів та установок сумісного спалювання відходів: Наказ № 856*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0962-25#Text>.

163. Ганошенко, О. М., Голік, Ю. С., & Колтунов, Г. А. (2014). Комплексний підхід до проблеми утилізації відпрацьованих автомобільних фільтрів. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, 3–4, 112–118.

164. Голік, Ю. С., & Ганошенко, О. М. (2017). Зменшення забруднюючих речовин при утилізації відпрацьованих автомобільних масляних фільтрів. *Проблеми екологічної безпеки* (с. 111). Кременчук.

165. Нестеренко, Б. М., & Кутний, Б. А. (2025). Результати експериментальних досліджень зі зменшення концентрації СО в димових газах твердопаливного котла. Н. О. Смоляр, О. Е. Ілляш, & В. І. Бредун (ред.), *Навколишнє середовище і здоров'я людини* (с. 25–30). Полтава: Астроя. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/20260>.

166. Голік, Ю. С., Кутний, Б. А., Серга, Т. М., & Чепурко, Ю. В. (2024). Підвищення теплотворної здатності побутових відходів як альтернативного виду

палива. *76-та наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету* (с. 328–329). Полтава.

167. Голік, Ю. С., Кутний, Б. А., & Серга, Т. М. (2025). Використання низькосортних видів палива як енергетичного ресурсу побутових відходів. О. Е. Ілляш (ред.), *Екологія. Довкілля. Енергозбереження – 2025* (с. 170–179). Полтава.

168. Голік, Ю. С., Кутний, Б. А., Серга, Т. М., & Єрмоленко, Д. Д. (2025). Визначення експериментальним шляхом теплоти згорання ресурсоцінних відходів. *Тези 77-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів* (с. 267–268). Полтава.

169. Holik, Y., Serha, T. & Kutnyi, B. (2026). Calorific value of household waste and peat from the Poltava region. *Environmental Problems*, 11(1), 61–65. <https://doi.org/10.23939/ep2026.01.061>.

170. Серга, Т. М. (2025). Використання горючих фракцій побутових відходів зі сміттєзвалищ як елемент управління відходами. *Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології* (с. 111–113). Київ.

171. Серга, Т. М., & Голік, Ю. С. (2025). Експериментальне дослідження вологості та зольності побутових відходів і торфу. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження»* (с. 126–128). Полтава.

172. Серга, Т. М., & Голік, Ю. С. (2026). Вологість та зольність побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини. *Екологічні науки*, 2(65), 339–344. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.2-65.48>

173. Серга, Т.М., & Чепурко, А.О. (2025). Еколого-енергетичні характеристики побутових відходів і торфу як паливної суміші. *Тези 77-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Том 1.* (с. 308–309). Полтава.

174. Вислоух, С. П., Волошко, О. В., Тимчик, Г. С., & Філіппова, М. В. (2023). *Комп'ютерне моделювання процесів і систем. Методи оптимізації*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.

175. Altep. (n.d.). *Промисловий твердопаливний котел DUO PLUS*. <https://altep.ua/catalog/kotel-duo-duo-plus-promisloviy/p28>
176. Konsort. (n.d.). *Лінія для сортування ТПВ до 150 000 тонн на рік*. <https://konsort.com.ua/catalog/liniya-dlya-sortuvannya-tpv-do-150-000-ton-v-rik/>
177. Konsort. (n.d.). *Лінія для сортування ТПВ до 50 000 тонн на рік*. <https://konsort.com.ua/catalog/liniya-dlya-sortuvannya-tpv-do-50-000-ton-v-rik/>
178. Konsort. (n.d.). *Лінія для сортування ТПВ до 10 000 тонн на рік*. <https://konsort.com.ua/catalog/liniya-dlya-sortuvannya-smittya-tpv-do-10-000-ton-v-rik/>
179. Konsort. (n.d.). *Мобільна лінія сортування відходів*. <https://konsort.com.ua/catalog/mobilna-liniya-dlya-sortuvannya-smittya-tpv/>
180. Серга, Т. М. (2026). Енергетичний потенціал композиційних сумішей. *Тези 78-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів* (с. 335–336). Полтава.
181. Голік, Ю., Ілляш, О., Серга, Т., & Чепурко, Ю. (2024). Сортувальні лінії як елемент управління побутовими відходами на регіональному рівні. *Галузеве машинобудування, будівництво*, 1(62), 63–68. <https://doi.org/10.26906/znp.2024.62.3561>
182. Серга, Т. М. (2026). Оптимізація функції енергоефективності за допомогою методу градієнтного підйому. *Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference «International Experience in Scientific Research»* (pp. 304–308). Chicago: VoScience Publisher.
183. Серга, Т. М. (2026). Дослідження складу димових газів композиційних сумішей. *Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference «Science and Education: Synergy of Innovation»* (pp. 171–175). Berlin: MDPC Publishing.

ДОДАТКИ

Додаток А

Акти впровадження результатів дослідження

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

"ПОНОРИ"

17221, Чернігівська обл., Прилуцький р-н, с. Понори, вул. Вишнева, 13
р/р UA293005280000026002000037653, МФО 300528 в АТ «ОТП Банк», код ЄДРПОУ 30866091,
тел. (050) 438-43-84

Вих. №92

від 13.08.2025 року

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ технології створення оптимальних композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів і торфу

Даною довідкою підтверджується, що результати розробленої технології створення оптимальних композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів і торфу, запропонованою Сергієм Т.М., аспіранткою спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища» кафедри прикладної екології та природокористування Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», рекомендовано до застосування на підприємстві ТОВ «Понори» Прилуцького району Чернігівської області.

За результатами дисертаційного дослідження встановлено, що горючі фракції побутових відходів і торфу мають високу теплотвірну здатність, тому існує можливість отримання економічного ефекту при застосуванні композиційних сумішей, оскільки використання енергетичного потенціалу даного виду палива дозволяє суттєво зменшити щорічні витрати на опалення підприємства ТОВ «Понори».

Утворення побутових відходів на території підприємства та наявність значних родовищ торфу в Чернігівській області додатково підтверджує про необхідність застосування останніх як альтернативного виду палива у вигляді композиційних сумішей.

Отже, практичні результати та рекомендації дисертаційного дослідження аспірантки Сергія Т.М. будуть використані при плануванні фінансово-господарської діяльності ТОВ «Понори» на 2026 рік.

Заступник директора
з виробництва ТОВ «Понори»



Євген ПОЛЯКОВ

Рис. А.1 – Акт впровадження дисертаційного дослідження
у роботу ТОВ «Понори»



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

просп. Віталія Грицаєнка, 24, м. Полтава, 36011,
тел./факс (0532) 56 98 94, (0532) 60 87 30 (приймальня), web: www.nupp.edu.ua,
e-mail: rector@nupp.edu.ua, kanc@nupp.edu.ua,
Код ЄДРПОУ 02071100

13 04 20 26 № 01.1-9/1239 На № _____ від ____ 20__

У спеціалізовану вчену раду

Про впровадження результатів
дисертаційної роботи

ДОВІДКА

Експериментальні дослідження, висновки та рекомендації дисертаційної роботи Серги Тетяни Миколаївни за темою: «Удосконалення технології перероблення побутових відходів із розробленням композиційних сумішей» впроваджені у навчальний процес підготовки здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності G2 «Технології захисту навколишнього середовища» Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Результатом впровадження є розроблені методичні рекомендації для виконання курсового проектування з навчальної дисципліни «Управління відходами та земельними ресурсами», які враховують такі елементи напрацювань дисертаційного дослідження:

- морфологічний склад побутових відходів селища Котельва Полтавського району Полтавської області;
- практичні результати теплотвірної здатності та екологічні аспекти процесу спалювання композиційних сумішей на основі горючих фракцій побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини;
- рекомендації щодо використання удосконаленої технології перероблення побутових відходів із розробленням композиційних сумішей шляхом спалювання в теплогенеруючих установках малої потужності.

Проректор з наукової роботи

Олена СТЕПОВА

Директор Департаменту забезпечення
якості вищої освіти

Олег МАКСИМЕНКО

**Рис. А.2 – Акт впровадження дисертаційного дослідження
у навчальний процес**

Додаток Б

Інформаційна довідка щодо характеристики етапів дослідження [124]

План:

- 1) визначення критеріїв вибору місць та умов проведення сортувальних аналізів ПВ;
- 2) обґрунтування вибору регіону досліджень;
- 3) визначення місць та умов проведення досліджень складу ПВ;
- 4) обґрунтування кількості й періодів проведення відбору проб.

Визначення критеріїв вибору місць та умов проведення сортувальних аналізів ТПВ. Детальний аналіз інформації допоміг нам виділити основні чинники, що, на нашу думку, впливають на процеси формування морфологічного складу побутових відходів: тип громади, демографічні показники громади, структура забудови та житлового фонду, архітектурно-планувальні особливості, специфіка соціально-побутового сектору, промислова специфіка регіону, структура комунального господарства громади та наявна спеціалізована техніка для збирання ПВ, існуюча муніципальна система збирання ПВ.

За результатами проведеної типізації сформовано перелік критеріїв для обґрунтування вибору місця/об'єкту досліджень морфологічного складу побутових відходів.

Обґрунтування вибору регіону досліджень. На основі даних критеріїв був проведений аналіз територіальних громад Полтавської області та обрано в якості об'єкту дослідження селище Котельва та Котелевську громаду як «характерного» представника громад Полтавської області, враховуючи особливості адміністративного устрою області.

Охарактеризуємо більш детально відповідність визначеним критеріям обраного «характерного» представника: Котелевської територіальної громади.

1. Тип громади – селищно-сільська. Згідно Закону України №8263 «Про децентралізацію порядку вирішення окремих питань адміністративно-територіального устрою» Котельва за кількістю населення підпадає під статус

міста, але за структурою забудови відповідає категорії селища. За вище зазначеним законом селища відносяться до населених пунктів сільського типу.

Характерними особливостями таких населених пунктів є концентрація інфраструктури міського типу в центрі селища, наявність невеликої кількості об'єктів багатоповерхової забудови, а також значна кількість територій, які мають сільський характер планування.

2. *Демографічні показники громади з урахуванням внутрішньо переміщених осіб* (далі – ВПО). Для Котелевської громади як для «характерного» представника громад області селищно-сільського типу властиві наступні демографічні показники:

- у структурі населення переважають люди передпенсійного та пенсійного віку;
- кількість молодого населення в громадах поступово скорочується і в останні роки ця тенденція посилюється;
- характерним процесом для останніх 1,5 років є збільшення частини тимчасово переміщених осіб за різними громадами та в цілому для Полтавської області. Характерною є наявність приблизно 10% ВПО у загальній чисельності населення громади.

3. *Структура забудови та житлового фонду*. Близько 58% від всього населення Полтавської області (за даними 2021 року), що проживає в громадах різних типів – це мешканці приватного сектору забудови (в більшості це одноповерховий житловий фонд) з присадибними ділянками, які використовуються для введення особистого сільського господарства.

Для Котелевської громади характерним є переважання у житловому фонді приватної забудови, що також характерне для багатьох подібних громад Полтавської області. Тобто для селищно-сільських громад приватна забудова може складати до 90% від усього житлового фонду, а у громадах сільського типу - 100%. Житловий фонд в різних типах громад має свої особливості. Для громад селищно-сільського типу, в тому числі й Котелевської громади, в яких більшість

житлового фонду - це одноповерхова приватна садибна забудова, характерними є наступні ознаки:

1) наявність присадибних індивідуальних ділянок, при обслуговуванні яких утворюються відходи садівництва (сільськогосподарські відходи);

2) забезпеченість мережами освітлення, підведеними мережами газопостачання та переважна відсутність мереж централізованого водопостачання та мереж централізованої каналізації, тобто каналізація організована у вигляді вигрібних ям та септиків на територіях приватних ділянок, що передбачає утворення рідких побутових відходів;

3) наявний небагато чисельний багатоквартирний житловий фонд, який, як правило, не має одного з видів благоустрою (централізованих опалення або водопостачання, або каналізації) та відсутні присадибні індивідуальні ділянки, що, з одного боку, знижує обсяги потенційного утворення відходів садівництва, а з іншого боку, збільшуються обсяги харчових відходів за відсутності можливостей індивідуального компостування.

Такі особливості житлового фонду є характерними для більшості селищ й громад Полтавської області, зокрема й для селища Котельва та Котелевської громади.

4. Архітектурно-планувальні особливості селища Котельва та сіл громади, їх розташування відносно основних транспортних магістралей та полігону (звалища) ПВ. Архітектурно-планувальні особливості населених пунктів Полтавської області полягають у наступному. Для сільських населених пунктів характерною особливістю архітектурного планування даних поселень є як правило наявність однієї центральної вулиці, вздовж якої розташована більшість одноповерхового приватного житлового фонду з присадибними ділянками різної площі, на яких ведеться особисте сільське господарство. Для таких сільських населених пунктів характерним є низька якість або відсутність твердого дорожнього покриття, що суттєво впливає на можливості санітарного обслуговування даних територій.

Для селищ, у тому числі й Котельви, характерною особливістю є відсутність чітко вираженої радіальної чи лінійної структури планування вуличної мережі, обмеженість ширини окремих вулиць. Це формує специфічні умови для організації руху спеціалізованого транспорту під час збирання відходів на даних вулицях, а також складність з встановленням контейнерних майданчиків.

Зазначені архітектурно-планувальні особливості сільських населених пунктів обумовлюють складності в питанні облаштування контейнерних майданчиків для збирання побутових відходів від населення, перш за все з метою роздільного збирання, а іноді й взагалі унеможлиблює їх організацію. Відповідно в більшості випадків це призводить до можливості організації лише системи збирання змішаних побутових відходів, що безпосередньо впливає на морфологічний склад побутових відходів, які направляються на місце їх видалення.

5. *Специфіка соціально-побутової сфери.* Сільські населені пункти практично в більшості своїй не мають розвиненого соціально-побутового сектору. Як правило соціально-побутова мережа обмежується сільрадою, магазином, може бути фельдшерсько-акушерський пункт. Відповідно переважні обсяги побутових відходів утворюються в житловому фонді.

6. *Промислово-господарська специфіка громади.* За специфікою промислової організації Котелевська громада має характерну структуру, яка є притаманною для більшості селищно-сільських громад середньої частини Полтавської області. Основним напрямом діяльності більшості промислових об'єктів області є сільське господарство та переробка сільськогосподарської сировини. Також, в селищі Котельва та навколо неї функціонують невелика кількість невеликих промислових підприємств та розміщені об'єкти нафтогазового комплексу. Така структура характерна для більшості громад Полтавської області, а саме її північної, центральної, східної та південно-східної частини.

7. *Структура комунального господарства громади.* Як правило, у більшості громад області комунальне підприємство територіально розташоване в

адміністративному центрі громади і обслуговує, здебільшого, адміністративний центр громади. В окремих випадках здійснюється і обслуговування сільських населених пунктів громади, які мають максимальну чисельність жителів або територіально розташовані в рамках однієї агломерації з адміністративним центром.

Характерною особливістю організації комунального обслуговування в Котелевській громаді є обслуговування всіх населених пунктів, в тому числі й сільських, одним централізованим комунальним підприємством громади, яке розташоване в селищі Котельва. Даний досвід є важливим, оскільки дозволяє в рамках одного об'єкту поводження з відходами (полігону (звалища) ПВ Котельва) дослідити морфологічний склад відходів, утворених в різних населених пунктах громади та на об'єктах їх обслуговування, а також в господарсько-промисловому секторі.

8. *Наявна спецтехніка.* Досвід проектування схем санітарної очистки для сільських і селищно-сільських об'єднаних громад Полтавської області свідчить про те, що в більшості громад транспортне забезпечення, яке існує на комунальних підприємствах даних громад, потребує суттєвої модернізації. Частіше за все, вік транспортних засобів складає понад 10 років. Це, здебільшого, застарілі моделі транспортних засобів із застарілим технологічним обладнанням, які мають нижчий рівень технологічної ефективності, ніж передові зразки європейської продукції.

9. *Існуюча система збору ПВ.* На даний час у Полтавській області переважає форма організації процесів збору твердих побутових відходів за декількома технологічними схемами:

- максимально поширена на даний час схема з унітарним збиранням ТПВ;
- схема із роздільним збиранням ПВ, коли ресурсоцінні відходи збираються в один контейнер;
- схема роздільного збирання ПВ, коли ресурсоцінні компоненти збираються в 3 контейнери (папір й картон, пластик, скло).

Крім того, саме з територій таких громад як Котелевська планується вивозити ПВ в крупні громади для подальшої переробки, а тому дослідження їх морфології важливим є як для організації системи збирання й вивезення ПВ з невеликих громад, так й для «приймаючих» крупних громад. Саме такий підхід є основним, що закладений у Стратегії управління побутовими відходами на рівні Полтавської області.

Визначення місць та умов проведення досліджень складу ПВ. Неможливість проаналізувати всю кількість відходів на досліджуваній території селища Котельва, обумовило потребу визначення репрезентативної вибірки для досліджуваної території, яка б характеризувала типову морфологію для обраного району досліджень.

Європейський підхід та «Методичні рекомендації щодо проведення сортування залишкових відходів» («Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen») Австрії передбачають три основні рівні, на яких може відбуватися відбір проб ПВ для аналізу:

1. У домогосподарстві / на підприємстві із внутрішніх відходів.
2. За межами домогосподарства / бізнесу, наприклад, із зовнішнього смітцевого бака / контейнера.
3. Зі смітцевого.

Згідно Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу побутових відходів, введених в дію Наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 03.05.2024 № 409:

▪ морфологічний склад твердих побутових відходів рекомендовано визначати за трьома джерелами їх утворення:

- 1) домогосподарства – багатоквартирні житлові будинки;
- 2) домогосподарства – одноквартирні житлові будинки;
- 3) інші джерела утворення побутових відходів (підприємства, установи та організації);

▪ визначення морфологічного складу побутових відходів рекомендується здійснювати шляхом:

- 1) вилучення побутових відходів з контейнерів;
- 2) збирання та перевезення побутових відходів транспортними засобами спеціального призначення для збирання та перевезення відповідного виду побутових відходів (далі – сміттєвози) без їх примусового ущільнення.

Перше дослідження (осінній період 2023 р.) було заплановане й проведене на звалищі ТПВ (більш детально надано в п.4.3.1) з метою обрання найбільш осередненої за складом проби побутових відходів після сміттєвозів. Однак, так як не завжди була відома інформація про усі джерела утворення побутових відходів, з яких вони збираються за маршрутом сміттєвоза, а значить характер складу відходів кожного сміттєвоза міг достатньо різнитися.

Так як морфологія побутових відходів, утворених у секторі приватної забудови та секторі багатоквартирної забудови відрізняється через наявність або відсутність приватного присадибного господарства, то для цілей даного дослідження найбільш оптимальними є території комплексного розміщення об'єктів багатопверхового житлового фонду, приватної забудови та об'єктів соціально-побутової й адміністративної сфери.

Обґрунтування кількості і періодів проведення досліджень

Крім того, українськими Методичними рекомендаціями встановлена рекомендована періодичність проведення досліджень у 4 пори року. Тому, в рамках даної НДР були заплановані й проведені 4 дослідницьких етапів у періоди відсутності соціально-культурних заходів, з яких 2 етапи у 2023 році (осінній і зимовий) й 2 етапи у 2024 році (весняний і літній), а саме:

- I етап: в осінній сезон – 27 вересня 2023 року;
- II етап: на початку зимового сезону – 30 листопада 2023 року;
- III етап: у весняний сезон – 9 травня 2024 року;
- IV етап: у літній сезон – 31 липня 2024 року.

З метою підвищення статистичної достовірності результатів на кожному етапі досліджень був запланований оптимальний об'єм відібраної проби з урахуванням можливості задіяння техніки і працівників комунального підприємства, тривалості світлового дня.

Додаток В

Результати досліджень морфологічного складу побутових відходів Полтавської області

Таблиця В.1

Морфологічний склад побутових відходів населених пунктів сільської місцевості Полтавської області

Назва компоненти проби	Найменування населеного пункту				
	с. Харсіки Чорнухинської громади (дослідження)	с. Яцини Пирятинської громади (дослідження)	с. Олександрівка Гребінківської громади (дослідження)	с. Криниця, Васильки, Гаївщина та Христанівка Лохвицької громади	с. Попівка та Малі Будища Опішнянськ ої громади
Відсоток від загальної маси, %					
Харчові відходи (овочі, фрукти, відходи садівництва тощо)	16,3	26	28,6	19,3	19,3
Папір і картон	9,7	3,8	18,8	1,4	1,4
Полімери (пластик, пластмаси)	22,7	7,7	23,3	7	7
Скло	13,7	2,2	10,3	24	24
Чорні метали	5	-	-	3,8	3,8
Кольорові метали	-	-	1,3		
Текстиль	10,1	6,7	2,9	2,1	2,1
Дерево	18,2	0	0	1,6	1,6
Небезпечні відходи	-	7,6	-	0,7	0,7
Кістки, шкіра, гума	-	3,4	-	3,1	3,1
Залишок ПВ після вилучення компонентів (дрібне будівельне сміття, каміння, вуличний змет тощо)	4,2	42,4	14,7	37	37
Загальна маса проби ПВ	100	100	100	100	100

Джерело: створено автором на основі даних [113-117].

Морфологічний склад побутових відходів населених пунктів
селищного типу Полтавської області

Назва компоненту проби	Найменування населеного пункту			
	смт. Новооржицьке Новооржицької громади (дослідження)	смт. Опішня Опішнянської громади	смт. Семенівка Семенівської громади	смт. Котельва Котелевської громади (дослідження)
	Відсоток від загальної маси, %			
Харчові відходи (овочі, фрукти, відходи садівництва тощо)	11,6	24	24	34,53
Папір і картон	14	8	8	4,94
Полімери (пластик, пластмаси)	15,1	13	13	12,14
Скло	9,5	18	18	7,93
Чорні метали	4,9	0,95	0,95	3,16
Кольорові метали	- ⁵			0,24
Текстиль	6,9	3,5	3,5	3,97
Дерево	12	1,15	1,15	0,16
Небезпечні відходи	-	0,55	0,55	0,01
Кістки, шкіра, гума	18,1	3,1	3,1	0,73
Залишок ПВ після вилучення компонентів (дрібне будівельне сміття, каміння, вуличний змет тощо)	7,2	27,75	27,75	32,19
Загальна маса проби ПВ	100	100	100	100

Джерело: створено автором на основі даних [117-120].

Морфологічний склад побутових відходів населених пунктів
міського типу Полтавської області

Назва компоненту проби	Найменування населеного пункту				
	м. Миргород		м. Лохвиця	м. Хорол (дослідження)	
	БПЖ	ПЖ		Відсоток за узагальненими результатами досліджень, %	Відсоток згідно Субрегіональної стратегії, %
	Відсоток від загальної маси, %				
Харчові відходи (овочі, фрукти, відходи садівництва тощо)	29	19	24	32,76	19
Папір і картон	9	7	8	11	7
Полімери (пластик, пластмаси)	13	13	13	12,06	13
Скло	15	21	18	6	21
Чорні метали	0,8	1,1	0,95	-	1,1
Кольорові метали				1,55	
Текстиль	3,5	3,5	3,5	3,6	3,5
Дерево	0,4	1,9	1,15	0,75	1,9
Небезпечні відходи	0,5	0,6	0,55	-	0,6
Кістки, шкіра, гума	1,8	4,4	3,1	1,12	4,4
Залишок ПВ після вилучення компонентів (дрібне будівельне сміття, каміння, вуличний змет тощо)	27	28,5	27,75	31,16	28,5
Загальна маса проби ПВ	100	100	100	100	100

Джерело: створено автором на основі даних [116, 121-122].

Додаток Г
Дослідження функції на екстремум

$$\begin{aligned}
 & > f := 26.184 - 0.722 \cdot x_1 + 0.645 \cdot x_2 - 0.719 \cdot x_3 + 0.187 \cdot x_4 - 4.291 \cdot x_5 - 0.192 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.272 \\
 & \quad \cdot x_1 \cdot x_4 + 0.351 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.326 \cdot x_3 \cdot x_4 - 0.232 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.411 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_5 + 1.302 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 \\
 & \quad - 0.248 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 + 1.441 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 - 0.252 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5; \\
 & f := 270.6987747 - 9.813666666 A - 0.1401420269 B - 0.3177272727 C - 0.4015500000 E \quad (1) \\
 & - 0.192 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) + 0.272 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B \\
 & - C - E) + 0.351 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.326 \left(\frac{2C}{11} \right. \\
 & \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) - 0.232 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B \\
 & - C - E) + 0.411 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.302 \left(\frac{200B}{2753} \right. \\
 & \left. - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.248 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B \\
 & - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.441 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C \\
 & - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.252 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 \\
 & - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & > x_1 := \frac{1000A - 22925}{75}; \\
 & \quad \quad \quad x_1 := \frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & > x_5 := \frac{E - 30}{20}; \\
 & \quad \quad \quad x_5 := \frac{E}{20} - \frac{3}{2} \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & > x_4 := \frac{100 - A - B - C - E - 1}{1}; \\
 & \quad \quad \quad x_4 := 99 - A - B - C - E \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & > x_3 := \frac{10C - 95}{55}; \\
 & \quad \quad \quad x_3 := \frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\gt; x_2 := \frac{1000 B - 50535}{13765};$$

$$x_2 := \frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \quad (6)$$

$\gt;$ *with(RealDomain);*

[\Im , \Re , \wedge , arccos, arccosh, arccot, arccoath, arcsec, arcsech, arcsin, arcsinh, arctan, arctanh, cos, cosh, cot, coth, csc, csch, eval, exp, expand, limit, ln, log, sec, sech, signum, simplify, sin, sinh, solve, sqrt, surd, tan, tanh] (7)

$\gt;$ *Diff(f, A) = simplify(diff(f, A));*

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial A} \left(270.6987747 - 9.813666666 A - 0.1401420269 B - 0.3177272727 C - 0.4015500000 E \right. \\ & - 0.192 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) + 0.272 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B \\ & - C - E) + 0.351 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.326 \left(\frac{2 C}{11} \right. \\ & \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) - 0.232 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B \\ & - C - E) + 0.411 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.302 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\ & \left. - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.248 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B \\ & - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.441 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C \\ & - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.252 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 \\ & - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \right) = ((0.002219066803 E - 0.06657200410) C \\ & + 2.726149985 - 0.09087166616 E) B^2 + ((0.002219066803 E - 0.06657200410) C^2 \\ & + (0.002219066803 E^2 + (0.004438133606 A - 0.5401439311) E - 0.1331440082 A \\ & + 14.76958205) C - 0.09087166616 E^2 + (-0.1817433323 A + 18.39314815) E \\ & - 479.1911202 + 5.452299970 A) B + (3.926640469 - 0.1121405409 E) C^2 + (\\ & -0.1121405409 E^2 + (-0.2242810818 A + 22.19383011) E - 625.6182347 \\ & + 7.853280939 A) C + 4.592199650 E^2 + (-706.4220474 + 9.184399300 A) E \\ & - 293.4713729 A + 17885.65762 \end{aligned} \quad (8)$$

$\gt;$ *Diff(f, B) = simplify(diff(f, B));*

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial B} \left(26.184 - 0.722 x_1 + 0.645 x_2 - 0.719 x_3 + 0.187 x_4 - 4.291 x_5 - 0.192 x_1 x_2 + 0.272 x_1 x_4 \right. \\ & \left. + 0.351 x_2 x_4 + 0.326 x_3 x_4 - 0.232 x_1 x_3 x_4 + 0.411 x_2 x_3 x_5 + 1.302 x_2 x_4 x_5 - 0.248 x_3 x_4 x_5 \right) \quad (9) \end{aligned}$$

$$+ 1.441 x_1 x_2 x_4 x_5 - 0.252 x_1 x_2 x_3 x_4 x_5) = 0$$

> Diff(f, C) = simplify(diff(f, C));

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial C} \left(270.6987747 - 9.813666666 A - 0.1401420269 B - 0.3177272727 C - 0.4015500000 E \right) \quad (10) \\ & - 0.192 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) + 0.272 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B \\ & - C - E) + 0.351 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.326 \left(\frac{2 C}{11} \right. \\ & \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) - 0.232 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B \\ & - C - E) + 0.411 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.302 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\ & \left. - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.248 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B \\ & - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.441 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C \\ & - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.252 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 \\ & - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \Big) = ((0.002219066803 E - 0.06657200410) B \\ & + 3.926640469 - 0.1121405409 E) A^2 + ((0.002219066803 E - 0.06657200410) B^2 \\ & + (0.002219066803 E^2 + (-0.5401439311 + 0.004438133606 C) E - 0.1331440082 C \\ & + 14.76958206) B - 0.1121405409 E^2 + (-0.2242810818 C + 22.19383012) E \\ & - 625.6182348 + 7.853280939 C) A + (1.526163194 - 0.05087210647 E) B^2 + (\\ & -0.05087210647 E^2 + (-0.1017442129 C + 11.21435318) E - 303.6240475 \\ & + 3.052326388 C) B + 2.573076445 E^2 + (-449.9520228 + 5.146152891 C) E \\ & + 12283.70271 - 180.2902837 C \end{aligned}$$

> #Diff(f, K) = simplify(diff(f, K));

> Diff(f, E) = simplify(diff(f, E));

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial E} \left(270.6987747 - 9.813666666 A - 0.1401420269 B - 0.3177272727 C - 0.4015500000 E \right) \quad (11) \\ & - 0.192 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) + 0.272 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B \\ & - C - E) + 0.351 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.326 \left(\frac{2 C}{11} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{19}{11} \Big) (99 - A - B - C - E) - 0.232 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B \\
& - C - E) + 0.411 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.302 \left(\frac{200B}{2753} \right. \\
& \left. - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.248 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B \\
& - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.441 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C \\
& - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.252 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 \\
& - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \Big) = ((0.002219066803 C - 0.09087166617) B \\
& + 4.592199650 - 0.1121405409 C) A^2 + ((0.002219066803 C - 0.09087166617) B^2 \\
& + (0.002219066803 C^2 + (-0.5401439311 + 0.004438133606 E) C - 0.1817433323 E \\
& + 18.39314815) B - 0.1121405409 C^2 + (-0.2242810818 E + 22.19383012) C \\
& - 706.4220475 + 9.184399300 E) A + (2.078503561 - 0.05087210646 C) B^2 + (\\
& -0.05087210646 C^2 + (-0.1017442129 E + 11.21435318) C - 373.2136330 \\
& + 4.157007122 E) B + 2.573076445 C^2 + (-449.9520228 + 5.146152891 E) C \\
& + 13759.76961 - 210.1171912 E
\end{aligned}$$

> eq1 := diff(f, A); eq2 := diff(f, B); eq3 := diff(f, C); eq5 := diff(f, E);

$$eq1 := 443.6178179 - 3.838145054 B - 7.253333333 A - 3.685939394 C - 3.626666667 E$$

$$\begin{aligned}
& - 3.093333333 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.232 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) - 1.302 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.248 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& + 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - 1.441 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753} \right. \\
& \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.252 \left(\frac{40A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)
\end{aligned}$$

$$eq2 := 91.64091025 - 3.838145054 A - 0.05099891028 B - 0.08477218241 C$$

$$\begin{aligned}
& - 0.02549945514 E + 0.232 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) + 0.2778583364 \left(\frac{2C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.09458772248 (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -1.302 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.1046857973 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) (99 - A \\
& - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 1.441 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - 0.01830730113 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& + 0.252 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)
\end{aligned}$$

$$eq3 := 90.54331194 - 3.685939394 A - 0.08477218241 B - 0.1185454545 C$$

$$\begin{aligned}
& - 0.05927272727 E - 0.04218181818 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + 0.232 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) - 1.227272727 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} \right. \\
& \left. - \frac{3}{2} \right) - 0.04509090909 (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.248 \left(\frac{2C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 1.441 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - 0.04581818182 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} \right. \\
& \left. - \frac{3}{2} \right) + 0.252 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)
\end{aligned}$$

$$eq5 := 84.59148921 - 3.626666667 A - 0.02549945514 B - 0.05927272727 C + 0.232 \left(\frac{40A}{3} \right. \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
& \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) + 0.02055000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \\
& - 1.302 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.06510000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 \\
& - A - B - C - E) + 0.248 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.01240000000 \left(\frac{2C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) - 1.441 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} \right. \\
& \left. - \frac{3}{2} \right) + 0.07205000000 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + 0.252 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - 0.01260000000 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B \\
& - C - E)
\end{aligned}$$

$$\left[> \text{sis} := \{eq1 = 0, eq2 = 0, eq3 = 0, eq5 = 0\};$$

$$sis := \left\{ 90.54331194 - 3.685939394 A - 0.08477218241 B - 0.1185454545 C \right. \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & - 0.05927272727 E - 0.04218181818 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B - C - E) \\ & + 0.232 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) - 1.227272727 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} \right. \\ & \left. - \frac{3}{2} \right) - 0.04509090909 (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.248 \left(\frac{2 C}{11} \right. \\ & \left. - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 1.441 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\ & - 0.04581818182 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} \right. \\ & \left. - \frac{3}{2} \right) + 0.252 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 91.64091025 - 3.838145054 A - 0.05099891028 B - 0.08477218241 C - 0.02549945514 E \\ & + 0.232 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) + 0.2778583364 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\ & + 0.09458772248 (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 1.302 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\ & \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.1046857973 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} \right. \\ & \left. - \frac{3}{2} \right) - 1.441 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\ & - 0.01830730113 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\ & + 0.252 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 443.6178179 - 3.838145054 B - 7.253333333 A - 3.685939394 C - 3.626666667 E \\ & - 3.093333333 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.232 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\ & \left. - \frac{19}{11} \right) - 1.302 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.248 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\ & + 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\ & - 1.441 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\ & \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.252 \left(\frac{40 A}{3} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{917}{3} \left) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) = 0, 84.59148921 \\
& - 3.626666667 A - 0.02549945514 B - 0.05927272727 C + 0.232 \left(\frac{40A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) + 0.02055000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \\
& - 1.302 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.06510000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left. \right) 99 \\
& - A - B - C - E) + 0.248 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.01240000000 \left(\frac{2C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) - 1.441 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} \right. \\
& \left. - \frac{3}{2} \right) + 0.07205000000 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left. \right) 99 - A - B - C - E) \\
& + 0.252 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - 0.01260000000 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left. \right) 99 - A - B \\
& \left. - C - E) = 0 \right\}
\end{aligned}$$

Критичні точки

$$\begin{aligned}
& s := \text{solve}(sis); \\
\vec{s} := & \{A = 22.84662786, B = 49.44998188, C = 10.71809410, E = 72.67307411\}, \\
& = 23.12548742, B = 48.20679277, C = 17.97309242, E = 25.61059759\}, \{A = 23.24067543, B \\
& = 41.60387202, C = 24.35653000, E = 18.77883333\}, \{A = 23.16084136, B = 21.56605807, C \\
& = 28.02658164, E = 27.19528555\}, \{A = 34.56944394, B = 12.13313578, C = 29.39792289, E \\
& = 22.71687863\}, \{A = 23.28084768, B = 52.15318103, C = 38.39473444, E \\
& = -14.07917048\}, \{A = 22.76323594, B = 79.13251528, C = 41.87540693, E \\
& = -43.32357429\}, \{A = 12.72382113, B = -9.126172644, C = 52.31096261, E \\
& = 43.24780667\}, \{A = 23.02315312, B = -59.40923420, C = 97.59929238, E \\
& = 33.15538846\}, \{A = 23.07404107, B = -4.773619199 \times 10^9, C = 4.773619244 \times 10^9, E \\
& = 30.00000003\}, \{A = 22.77595893, B = -7.545469154 \times 10^9, C = 7.545469201 \times 10^9, E \\
& = 30.00000005\}, \{A = -1.155360482 \times 10^{10}, B = 50.53500000, C = 7.769701280 \times 10^{10}, E \\
& = -6.614340793 \times 10^{10}\}, \{A = 23.02581840, B = 54.73347433, C = -1.849969157, E \\
& = 21.53637683\}, \{A = 22.88084544, B = 45.08856027, C = -2.494412753, E \\
& = 50.64432447\}, \{A = 22.87294235, B = 42.18035142, C = -25.60894588, E \\
& = 60.12646071\}, \{A = 22.92454154, B = 48.25694617, C = -29.22607709, E \\
& = 56.47908537\}
\end{aligned}$$

(14)

Додаток Г

Розрахунки головних мінорів в стаціонарних точках

with(VectorCalculus);

with(LinearAlgebra);

[&x, `*`, `+`, `-', `.`; <, >,

ConvertVector, CrossProduct, Curl,

DotProduct, Flux, GetCoordinateParameters,

GetRootPoint, GetSpace, Gradient, Hessian, IsPositionVector, IsRootedVector, IsVectorField,

Jacobian, Laplacian, LineInt, MapToBasis, ∇ , Norm, Normalize, PathInt, PlotPositionVector,

PlotVector, PositionVector, PrincipalNormal, RadiusOfCurvature, RootedVector,

ScalarPotential, SetCoordinateParameters, SetCoordinates, SpaceCurve, SurfaceInt,

TNBFrame, TangentLine, TangentPlane, TangentVector, Torsion, Vector, VectorField,

VectorPotential, VectorSpace, Wronskian, diff, eval, evalVF, int, limit, series]

[&x, *Add, Adjoint, BackwardSubstitute, BandMatrix, Basis, BezoutMatrix, BidiagonalForm,*

BilinearForm, CARE, CharacteristicMatrix, CharacteristicPolynomial, Column, (1)

ColumnDimension, ColumnOperation, ColumnSpace, CompanionMatrix,

CompressedSparseForm, ConditionNumber, ConstantMatrix, ConstantVector, Copy,

CreatePermutation, CrossProduct, DARE, DeleteColumn, DeleteRow, Determinant, Diagonal,

DiagonalMatrix, Dimension, Dimensions, DotProduct, EigenConditionNumbers, Eigenvalues,

Eigenvectors, Equal, ForwardSubstitute, FrobeniusForm, FromCompressedSparseForm,

FromSplitForm, GaussianElimination, GenerateEquations, GenerateMatrix, Generic,

GetResultDataType, GetResultShape, GivensRotationMatrix, GramSchmidt, HankelMatrix,

HermiteForm, HermitianTranspose, HessenbergForm, HilbertMatrix, HouseholderMatrix,

IdentityMatrix, IntersectionBasis, IsDefinite, IsOrthogonal, IsSimilar, IsUnitary,

JordanBlockMatrix, JordanForm, KroneckerProduct, LA_Main, LUdecomposition,

LeastSquares, LinearSolve, LyapunovSolve, Map, Map2, MatrixAdd, MatrixExponential,

MatrixFunction, MatrixInverse, MatrixMatrixMultiply, MatrixNorm, MatrixPower,

MatrixScalarMultiply, MatrixVectorMultiply, MinimalPolynomial, Minor, Modular, Multiply,

NoUserValue, Norm, Normalize, NullSpace, OuterProductMatrix, Permanent, Pivot,

PopovForm, ProjectionMatrix, QRdecomposition, RandomMatrix, RandomVector, Rank,

RationalCanonicalForm, ReducedRowEchelonForm, Row, RowDimension, RowOperation,

RowSpace, ScalarMatrix, ScalarMultiply, ScalarVector, SchurForm, SingularValues,

SmithForm, SplitForm, StronglyConnectedBlocks, SubMatrix, SubVector, SumBasis,

SylvesterMatrix, SylvesterSolve, ToeplitzMatrix, Trace, Transpose, TridiagonalForm,

UnitVector, VandermondeMatrix, VectorAdd, VectorAngle, VectorMatrixMultiply, VectorNorm,

VectorScalarMultiply, ZeroMatrix, ZeroVector, Zip]

$$H := \text{Hessian} \left(270.6987747 - 9.813666666 A - 0.1401420269 B - 0.3177272727 C \right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
& -0.4015500000 E - 0.192 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) + 0.272 \left(\frac{40A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.351 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + 0.326 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) - 0.232 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.411 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} \right. \\
& \left. - \frac{3}{2} \right) + 1.302 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - 0.248 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.441 \left(\frac{40A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.252 \left(\frac{40A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right), \\
& [A, B, C, E] \Bigg);
\end{aligned}$$

$$H := \left[\left[-17.93939394 + 1.124848485 C - 38.42666666 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \right] \right] \quad (3)$$

$$+ 6.720000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right), -9.039293773$$

$$+ 0.5624242424 C - 0.004729386124 E + 1.395810631 (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20}$$

$$- \frac{3}{2} \right) - 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

$$- \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} - 0.2440973483 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99$$

$$- A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11}$$

$$- \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, -77.67018181$$

$$\begin{aligned}
& + 1.124848485 A + 0.5624242424 B + 1.124848485 C + 0.5646787879 E \\
& - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.6109090909 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& \left. - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -8.752115624 \\
& + 0.5646787879 C - 0.004729386124 B - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& + 0.9606666665 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.1680000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg] \\
& \left[-9.039293773 + 0.5624242424 C - 0.004729386124 E + 1.395810631 (99 - A - B - C \right. \\
& \left. - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} - 0.2440973483 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 \\
& - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, 0.2327642571 \\
& - 0.009458772248 E - \frac{400 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, -12.91224590 \\
& + 0.5624242424 A - 0.002203401248 E \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& - \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{30283} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, 0.7995940264 \\
& - 0.002203401248 C - 0.009458772248 E - 0.004729386124 A - 0.009458772248 B \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{10 (19.21333333 A - 440.4656667) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& - \frac{10 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg], \\
& \left[-77.67018181 + 1.124848485 A + 0.5624242424 B + 1.124848485 C + 0.5646787879 E \right. \\
& - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.6109090909 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& - \left. \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& - \left. \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& + \left. \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11} \right], -12.91224590 \\
& + 0.5624242424 A - 0.002203401248 E \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& - \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{30283}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -26.04096969 \\
& + 1.124848485 A + 0.004509090908 E \\
& + \frac{4 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -13.03982069 \\
& + 0.5646787879 A - 0.002203401248 B + 0.004509090909 E + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.46566667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11} \\
& - \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)}{110} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg], \\
& \left[-8.752115624 + 0.5646787879 C - 0.004729386124 B - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.9606666665 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \right. \\
& \left. - \frac{(19.21333333 A - 440.46566667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.1680000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \right.
\end{aligned}$$

$$- \frac{19}{11} \Big) (99 - A - B - C - E)$$

$$+ \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, 0.7995940264$$

$$- 0.002203401248 C - 0.009458772248 E - 0.004729386124 A - 0.009458772248 B$$

$$- \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$+ \frac{10 (19.21333333 A - 440.4656667) (99 - A - B - C - E)}{2753}$$

$$- \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20}$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$- \frac{10 (3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)}{2753}$$

$$+ \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, -13.03982069$$

$$+ 0.5646787879 A - 0.002203401248 B + 0.004509090909 E + 0.004509090908 C$$

$$- \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20}$$

$$+ \frac{2 (3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}$$

$$- \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)}{110}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, \\
& -0.009458772248 B + 0.4351626920 + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{10} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{10} \Bigg]
\end{aligned}$$

> $H := \text{evalf}(\text{subs}(\{A = 23.16084136, B = 21.56605807, C = 28.02658164, E = 27.19528555\}, H));$

$$H := \begin{bmatrix} 8.925979845 & 4.360061086 & 5.277228921 & 5.625930348 \\ 4.360061086 & 0.01347045374 & 0.1141498989 & 0.3755699549 \\ 5.277228921 & 0.1141498989 & 0.2191372430 & 0.4641703488 \\ 5.625930348 & 0.3755699549 & 0.4641703488 & 0.7494201832 \end{bmatrix}$$

(4)

> $D1 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..1, 1..1));$
 $D2 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..2, 1..2));$
 $D3 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..3, 1..3));$

$$D1 := 8.925979845$$

$$D2 := -18.88989567$$

$$D3 := 0.622031708$$

(5)

>

> *with(LinearAlgebra);*
[&x, *Add, Adjoint, BackwardSubstitute, BandMatrix, Basis, BezoutMatrix, BidiagonalForm, BilinearForm, CARE, CharacteristicMatrix, CharacteristicPolynomial, Column, ColumnDimension, ColumnOperation, ColumnSpace, CompanionMatrix, CompressedSparseForm, ConditionNumber, ConstantMatrix, ConstantVector, Copy, CreatePermutation, CrossProduct, DARE, DeleteColumn, DeleteRow, Determinant, Diagonal, DiagonalMatrix, Dimension, Dimensions, DotProduct, EigenConditionNumbers, Eigenvalues, Eigenvectors, Equal, ForwardSubstitute, FrobeniusForm, FromCompressedSparseForm, FromSplitForm, GaussianElimination, GenerateEquations, GenerateMatrix, Generic, GetResultDataType, GetResultShape, GivensRotationMatrix, GramSchmidt, HankelMatrix, HermiteForm, HermitianTranspose, HessenbergForm, HilbertMatrix, HouseholderMatrix, IdentityMatrix, IntersectionBasis, IsDefinite, IsOrthogonal, IsSimilar, IsUnitary, JordanBlockMatrix, JordanForm, KroneckerProduct, LA_Main, LUdecomposition, LeastSquares, LinearSolve, LyapunovSolve, Map, Map2, MatrixAdd, MatrixExponential, MatrixFunction, MatrixInverse, MatrixMatrixMultiply, MatrixNorm, MatrixPower, MatrixScalarMultiply, MatrixVectorMultiply, MinimalPolynomial, Minor, Modular, Multiply, NoUserValue, Norm, Normalize, NullSpace, OuterProductMatrix, Permanent, Pivot, PopovForm, ProjectionMatrix, QRdecomposition, RandomMatrix, RandomVector, Rank, RationalCanonicalForm, ReducedRowEchelonForm, Row, RowDimension, RowOperation, RowSpace, ScalarMatrix, ScalarMultiply, ScalarVector, SchurForm, SingularValues, SmithForm, SplitForm, StronglyConnectedBlocks, SubMatrix, SubVector, SumBasis, SylvesterMatrix, SylvesterSolve, ToeplitzMatrix, Trace, Transpose, TridiagonalForm, UnitVector, VandermondeMatrix, VectorAdd, VectorAngle, VectorMatrixMultiply, VectorNorm, VectorScalarMultiply, ZeroMatrix, ZeroVector, Zip]* (1)

> *with(VectorCalculus);*
[&x, `*`, `+`, `-`, `.` , <, >, <|>, *About, AddCoordinates, ArcLength, BasisFormat, Binormal, ConvertVector, CrossProduct, Curl, Curvature, D, Del, DirectionalDiff, Divergence, DotProduct, Flux, GetCoordinateParameters, GetCoordinates, GetNames, GetPVDescription, GetRootPoint, GetSpace, Gradient, Hessian, IsPositionVector, IsRootedVector, IsVectorField, Jacobian, Laplacian, LineInt, MapToBasis, ∇ , Norm, Normalize, PathInt, PlotPositionVector, PlotVector, PositionVector, PrincipalNormal, RadiusOfCurvature, RootedVector, ScalarPotential, SetCoordinateParameters, SetCoordinates, SpaceCurve, SurfaceInt, TNBFrame, TangentLine, TangentPlane, TangentVector, Torsion, Vector, VectorField, VectorPotential, VectorSpace, Wronskian, diff, eval, evalVF, int, limit, series]*
[&x, *Add, Adjoint, BackwardSubstitute, BandMatrix, Basis, BezoutMatrix, BidiagonalForm, BilinearForm, CARE, CharacteristicMatrix, CharacteristicPolynomial, Column,* (2)

ColumnDimension, ColumnOperation, ColumnSpace, CompanionMatrix, CompressedSparseForm, ConditionNumber, ConstantMatrix, ConstantVector, Copy, CreatePermutation, CrossProduct, DARE, DeleteColumn, DeleteRow, Determinant, Diagonal, DiagonalMatrix, Dimension, Dimensions, DotProduct, EigenConditionNumbers, Eigenvalues, Eigenvectors, Equal, ForwardSubstitute, FrobeniusForm, FromCompressedSparseForm, FromSplitForm, GaussianElimination, GenerateEquations, GenerateMatrix, Generic, GetResultDataType, GetResultShape, GivensRotationMatrix, GramSchmidt, HankelMatrix, HermiteForm, HermitianTranspose, HessenbergForm, HilbertMatrix, HouseholderMatrix, IdentityMatrix, IntersectionBasis, IsDefinite, IsOrthogonal, IsSimilar, IsUnitary, JordanBlockMatrix, JordanForm, KroneckerProduct, LA_Main, LUdecomposition, LeastSquares, LinearSolve, LyapunovSolve, Map, Map2, MatrixAdd, MatrixExponential, MatrixFunction, MatrixInverse, MatrixMatrixMultiply, MatrixNorm, MatrixPower, MatrixScalarMultiply, MatrixVectorMultiply, MinimalPolynomial, Minor, Modular, Multiply, NoUserValue, Norm, Normalize, NullSpace, OuterProductMatrix, Permanent, Pivot, PopovForm, ProjectionMatrix, QRdecomposition, RandomMatrix, RandomVector, Rank, RationalCanonicalForm, ReducedRowEchelonForm, Row, RowDimension, RowOperation, RowSpace, ScalarMatrix, ScalarMultiply, ScalarVector, SchurForm, SingularValues, SmithForm, SplitForm, StronglyConnectedBlocks, SubMatrix, SubVector, SumBasis, SylvesterMatrix, SylvesterSolve, ToeplitzMatrix, Trace, Transpose, TridiagonalForm, UnitVector, VandermondeMatrix, VectorAdd, VectorAngle, VectorMatrixMultiply, VectorNorm, VectorScalarMultiply, ZeroMatrix, ZeroVector, Zip]

(3)

$$\begin{aligned}
 > H := \text{Hessian} \left(270.6987747 - 9.813666666 A - 0.1401420269 B - 0.3177272727 C \right. \\
 & \quad - 0.4015500000 E - 0.192 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) + 0.272 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
 & \quad \left. - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.351 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \\
 & \quad + 0.326 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) - 0.232 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\
 & \quad \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.411 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} \right. \\
 & \quad \left. - \frac{3}{2} \right) + 1.302 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
 & \quad - 0.248 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.441 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
 & \quad \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.252 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
 & \quad \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right),
 \end{aligned}$$

$[A, B, C, E]$);

$$\begin{aligned}
 H := & \left[\left[-17.93939394 + 1.124848485 C - 38.42666666 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \right. \right. \\
 & + 6.720000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right), -9.039293773 \\
 & + 0.5624242424 C - 0.004729386124 E + 1.395810631 (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} \right. \\
 & \left. \left. - \frac{3}{2} \right) - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \right. \\
 & \left. - \frac{200 (19.21333333 A - 440.46566667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} - 0.2440973483 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 \right. \\
 & \left. - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \right. \\
 & \left. + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, -77.67018181 \right. \\
 & \left. + 1.124848485 A + 0.5624242424 B + 1.124848485 C + 0.5646787879 E \right. \\
 & \left. - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.6109090909 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \right. \\
 & \left. + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -8.752115624 \right]
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
& + 0.5646787879 C - 0.004729386124 B - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& + 0.9606666665 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& - \left. \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.1680000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\
& - \left. \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + \left. \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \right], \\
& \left[-9.039293773 + 0.5624242424 C - 0.004729386124 E + 1.395810631 (99 - A - B - C \right. \\
& - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} - 0.2440973483 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 \\
& - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\
& - \left. \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, 0.2327642571 \\
& - 0.009458772248 E - \frac{400 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}
\end{aligned}$$

$$+ \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, -12.91224590$$

$$+ 0.5624242424 A - 0.002203401248 E$$

$$- \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$- \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{30283}$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$+ \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, 0.7995940264$$

$$- 0.002203401248 C - 0.009458772248 E - 0.004729386124 A - 0.009458772248 B$$

$$- \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$+ \frac{10 (19.21333333 A - 440.4656667) (99 - A - B - C - E)}{2753}$$

$$- \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20}$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$- \frac{10 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)}{2753}$$

$$+ \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20},$$

$$\begin{aligned}
& \left[-77.67018181 + 1.124848485 A + 0.5624242424 B + 1.124848485 C + 0.5646787879 E \right. \\
& - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.6109090909 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& \left. - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& \left. + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -12.91224590 \right. \\
& + 0.5624242424 A - 0.002203401248 E \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& - \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{30283} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& \left. + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -26.04096969 \right. \\
& + 1.124848485 A + 0.004509090908 E \\
& \left. + \frac{4 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -13.03982069 \right. \\
& \left. + 0.5646787879 A - 0.002203401248 B + 0.004509090909 E + 0.004509090908 C \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11} \\
& - \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)}{110} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg], \\
& \left[-8.752115624 + 0.5646787879 C - 0.004729386124 B - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \right. \\
& - \left. \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.9606666665 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& - \left. \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.1680000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\
& - \left. \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, 0.7995940264 \\
& - 0.002203401248 C - 0.009458772248 E - 0.004729386124 A - 0.009458772248 B \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{10 (19.21333333 A - 440.4656667) (99 - A - B - C - E)}{2753}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& - \frac{10 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, -13.03982069 \\
& + 0.5646787879 A - 0.002203401248 B + 0.004509090909 E + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11} \\
& - \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)}{110} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, \\
& -0.009458772248 B + 0.4351626920 + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{10} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{10} \Bigg]
\end{aligned}$$

> $H := \text{evalf}(\text{subs}(\{A=23.24067543, B=41.60387202, C=24.35653000, E=18.77883333\}, H));$

$$H := \begin{bmatrix} 2.077401246 & 4.721189451 & 8.249435092 & 4.171473749 \\ 4.721189451 & 0.3160111241 & 0.2475483962 & 0.1947351641 \\ 8.249435092 & 0.2475483962 & 0.3263502650 & 0.3043651417 \\ 4.171473749 & 0.1947351641 & 0.3043651417 & 0.3590993189 \end{bmatrix} \quad (5)$$

```
> D1 := Determinant(SubMatrix(H, 1..1, 1..1));
D2 := Determinant(SubMatrix(H, 1..2, 1..2));
D3 := Determinant(SubMatrix(H, 1..3, 1..3));
```

```
D1 := 2.077401246
```

```
D2 := -21.63314793
```

```
D3 := -9.410241814
```

(6)

```
>
>
```

> *with(LinearAlgebra);*
[&x, *Add, Adjoint, BackwardSubstitute, BandMatrix, Basis, BezoutMatrix, BidiagonalForm, BilinearForm, CARE, CharacteristicMatrix, CharacteristicPolynomial, Column, ColumnDimension, ColumnOperation, ColumnSpace, CompanionMatrix, CompressedSparseForm, ConditionNumber, ConstantMatrix, ConstantVector, Copy, CreatePermutation, CrossProduct, DARE, DeleteColumn, DeleteRow, Determinant, Diagonal, DiagonalMatrix, Dimension, Dimensions, DotProduct, EigenConditionNumbers, Eigenvalues, Eigenvectors, Equal, ForwardSubstitute, FrobeniusForm, FromCompressedSparseForm, FromSplitForm, GaussianElimination, GenerateEquations, GenerateMatrix, Generic, GetResultDataType, GetResultShape, GivensRotationMatrix, GramSchmidt, HankelMatrix, HermiteForm, HermitianTranspose, HessenbergForm, HilbertMatrix, HouseholderMatrix, IdentityMatrix, IntersectionBasis, IsDefinite, IsOrthogonal, IsSimilar, IsUnitary, JordanBlockMatrix, JordanForm, KroneckerProduct, LA_Main, LUDecomposition, LeastSquares, LinearSolve, LyapunovSolve, Map, Map2, MatrixAdd, MatrixExponential, MatrixFunction, MatrixInverse, MatrixMatrixMultiply, MatrixNorm, MatrixPower, MatrixScalarMultiply, MatrixVectorMultiply, MinimalPolynomial, Minor, Modular, Multiply, NoUserValue, Norm, Normalize, NullSpace, OuterProductMatrix, Permanent, Pivot, PopovForm, ProjectionMatrix, QRDecomposition, RandomMatrix, RandomVector, Rank, RationalCanonicalForm, ReducedRowEchelonForm, Row, RowDimension, RowOperation, RowSpace, ScalarMatrix, ScalarMultiply, ScalarVector, SchurForm, SingularValues, SmithForm, SplitForm, StronglyConnectedBlocks, SubMatrix, SubVector, SumBasis, SylvesterMatrix, SylvesterSolve, ToeplitzMatrix, Trace, Transpose, TridiagonalForm, UnitVector, VandermondeMatrix, VectorAdd, VectorAngle, VectorMatrixMultiply, VectorNorm, VectorScalarMultiply, ZeroMatrix, ZeroVector, Zip]* (1)

> *with(VectorCalculus);*
[&x, `*`, `+`, `-', `.` , <, >, <|>, *About, AddCoordinates, ArcLength, BasisFormat, Binormal, ConvertVector, CrossProduct, Curl, Curvature, D, Del, DirectionalDiff, Divergence, DotProduct, Flux, GetCoordinateParameters, GetCoordinates, GetNames, GetPVDescription, GetRootPoint, GetSpace, Gradient, Hessian, IsPositionVector, IsRootedVector, IsVectorField, Jacobian, Laplacian, LineInt, MapToBasis, ∇ , Norm, Normalize, PathInt, PlotPositionVector, PlotVector, PositionVector, PrincipalNormal, RadiusOfCurvature, RootedVector, ScalarPotential, SetCoordinateParameters, SetCoordinates, SpaceCurve, SurfaceInt, TNBFrame, TangentLine, TangentPlane, TangentVector, Torsion, Vector, VectorField, VectorPotential, VectorSpace, Wronskian, diff, eval, evalVF, int, limit, series]* (2)

(3)

$$\begin{aligned}
> H := \text{Hessian} & \left(270.6987747 - 9.813666666 A - 0.1401420269 B - 0.3177272727 C \right. \\
& - 0.4015500000 E - 0.192 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) + 0.272 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.351 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + 0.326 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) - 0.232 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.411 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} \right. \\
& \left. - \frac{3}{2} \right) + 1.302 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - 0.248 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.441 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.252 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right), \\
& \left. [A, B, C, E] \right);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H := & \left[\left[-17.93939394 + 1.124848485 C - 38.42666666 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \right. \right. \\
& + 6.720000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right), -9.039293773 \\
& + 0.5624242424 C - 0.004729386124 E + 1.395810631 (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} \right. \\
& \left. - \frac{3}{2} \right) - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& \left. - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} - 0.2440973483 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 \right. \\
& \left. - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \right] \quad (4)
\end{aligned}$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, -77.67018181$$

$$+ 1.124848485 A + 0.5624242424 B + 1.124848485 C + 0.5646787879 E$$

$$- 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.6109090909 \left(\frac{200B}{2753}$$

$$- \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753}$$

$$- \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

$$+ \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -8.752115624$$

$$+ 0.5646787879 C - 0.004729386124 B - 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

$$+ 0.9606666665 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)$$

$$- \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753}$$

$$- \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.1680000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11}$$

$$- \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)$$

$$+ \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg],$$

$$\left[-9.039293773 + 0.5624242424 C - 0.004729386124 E + 1.395810631 (99 - A - B - C$$

$$-E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\ - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} - 0.2440973483 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99$$

$$- A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11}$$

$$- \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, 0.2327642571$$

$$- 0.009458772248 E - \frac{400 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$+ \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, -12.91224590$$

$$+ 0.5624242424 A - 0.002203401248 E$$

$$- \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$- \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{30283}$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$+ \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, 0.7995940264$$

$$- 0.002203401248 C - 0.009458772248 E - 0.004729386124 A - 0.009458772248 B$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{10 (19.21333333 A - 440.4656667) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& - \frac{10 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg], \\
& \left[-77.67018181 + 1.124848485 A + 0.5624242424 B + 1.124848485 C + 0.5646787879 E \right. \\
& - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.6109090909 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& - \frac{10107}{2753} \left. \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& - \frac{10107}{2753} \left. \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -12.91224590 \\
& + 0.5624242424 A - 0.002203401248 E \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{30283} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -26.04096969 \\
& + 1.124848485 A + 0.004509090908 E \\
& + \frac{4 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -13.03982069 \\
& + 0.5646787879 A - 0.002203401248 B + 0.004509090909 E + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.46566667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11} \\
& - \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)}{110} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg], \\
& \left[-8.752115624 + 0.5646787879 C - 0.004729386124 B - 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.9606666665 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \right. \\
& \left. - \frac{(19.21333333 A - 440.46566667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753} \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{10107}{2753} \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.1680000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, 0.7995940264 \\
& - 0.002203401248 C - 0.009458772248 E - 0.004729386124 A - 0.009458772248 B \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{10 (19.21333333 A - 440.4656667) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& - \frac{10 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, -13.03982069 \\
& + 0.5646787879 A - 0.002203401248 B + 0.004509090909 E + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)}{110} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, \\
& -0.009458772248 B + 0.4351626920 + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.213333333 A - 440.46566667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{10} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{10} \Bigg]
\end{aligned}$$

> $H := \text{evalf}(\text{subs}(\{A = 23.12548742, B = 48.20679277, C = 17.97309242, E = 25.61059759\}, H));$

$$H := \begin{bmatrix} 1.235470847 & 4.034002090 & 9.978335908 & 2.561050727 \\ 4.034002090 & 0.08026066432 & 0.05599452858 & -0.1416292708 \\ 9.978335908 & 0.05599452858 & 0.09627346633 & 0.1208161931 \\ 2.561050727 & -0.1416292708 & 0.1208161931 & 0.1078280616 \end{bmatrix} \quad (5)$$

> $D1 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..1, 1..1));$
 $D2 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..2, 1..2));$
 $D3 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..3, 1..3));$

$$D1 := 1.235470847$$

$$D2 := -16.17401315$$

$$D3 := -5.044476755 \quad (6)$$

>

> *with(LinearAlgebra);*
[&x, *Add, Adjoint, BackwardSubstitute, BandMatrix, Basis, BezoutMatrix, BidiagonalForm, BilinearForm, CARE, CharacteristicMatrix, CharacteristicPolynomial, Column, ColumnDimension, ColumnOperation, ColumnSpace, CompanionMatrix, CompressedSparseForm, ConditionNumber, ConstantMatrix, ConstantVector, Copy, CreatePermutation, CrossProduct, DARE, DeleteColumn, DeleteRow, Determinant, Diagonal, DiagonalMatrix, Dimension, Dimensions, DotProduct, EigenConditionNumbers, Eigenvalues, Eigenvectors, Equal, ForwardSubstitute, FrobeniusForm, FromCompressedSparseForm, FromSplitForm, GaussianElimination, GenerateEquations, GenerateMatrix, Generic, GetResultDataType, GetResultShape, GivensRotationMatrix, GramSchmidt, HankelMatrix, HermiteForm, HermitianTranspose, HessenbergForm, HilbertMatrix, HouseholderMatrix, IdentityMatrix, IntersectionBasis, IsDefinite, IsOrthogonal, IsSimilar, IsUnitary, JordanBlockMatrix, JordanForm, KroneckerProduct, LA_Main, LUdecomposition, LeastSquares, LinearSolve, LyapunovSolve, Map, Map2, MatrixAdd, MatrixExponential, MatrixFunction, MatrixInverse, MatrixMatrixMultiply, MatrixNorm, MatrixPower, MatrixScalarMultiply, MatrixVectorMultiply, MinimalPolynomial, Minor, Modular, Multiply, NoUserValue, Norm, Normalize, NullSpace, OuterProductMatrix, Permanent, Pivot, PopovForm, ProjectionMatrix, QRdecomposition, RandomMatrix, RandomVector, Rank, RationalCanonicalForm, ReducedRowEchelonForm, Row, RowDimension, RowOperation, RowSpace, ScalarMatrix, ScalarMultiply, ScalarVector, SchurForm, SingularValues, SmithForm, SplitForm, StronglyConnectedBlocks, SubMatrix, SubVector, SumBasis, SylvesterMatrix, SylvesterSolve, ToeplitzMatrix, Trace, Transpose, TridiagonalForm, UnitVector, VandermondeMatrix, VectorAdd, VectorAngle, VectorMatrixMultiply, VectorNorm, VectorScalarMultiply, ZeroMatrix, ZeroVector, Zip]* (1)

> *with(VectorCalculus);*
[&x, `*`, `+`, `-', `.`; <, >, <|>, *About, AddCoordinates, ArcLength, BasisFormat, Binormal, ConvertVector, CrossProduct, Curl, Curvature, D, Del, DirectionalDiff, Divergence, DotProduct, Flux, GetCoordinateParameters, GetCoordinates, GetNames, GetPVDescription, GetRootPoint, GetSpace, Gradient, Hessian, IsPositionVector, IsRootedVector, IsVectorField, Jacobian, Laplacian, LineInt, MapToBasis, ∇ , Norm, Normalize, PathInt, PlotPositionVector, PlotVector, PositionVector, PrincipalNormal, RadiusOfCurvature, RootedVector, ScalarPotential, SetCoordinateParameters, SetCoordinates, SpaceCurve, SurfaceInt, TNBFrame, TangentLine, TangentPlane, TangentVector, Torsion, Vector, VectorField, VectorPotential, VectorSpace, Wronskian, diff, eval, evalVF, int, limit, series]* (2)

(3)

$$\begin{aligned}
> H := \text{Hessian} & \left(270.6987747 - 9.813666666 A - 0.1401420269 B - 0.3177272727 C \right. \\
& - 0.4015500000 E - 0.192 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) + 0.272 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.351 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + 0.326 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) - 0.232 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.411 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} \right. \\
& \left. - \frac{3}{2} \right) + 1.302 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - 0.248 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.441 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.252 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right), \\
& \left. [A, B, C, E] \right);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H := & \left[\left[-17.93939394 + 1.124848485 C - 38.42666666 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \right. \right. \quad (4) \\
& + 6.720000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right), -9.039293773 \\
& + 0.5624242424 C - 0.004729386124 E + 1.395810631 (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} \right. \\
& \left. - \frac{3}{2} \right) - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} - 0.2440973483 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 \\
& - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)
\end{aligned}$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, -77.67018181$$

$$+ 1.124848485 A + 0.5624242424 B + 1.124848485 C + 0.5646787879 E$$

$$- 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.6109090909 \left(\frac{200B}{2753}$$

$$- \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753}$$

$$- \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

$$+ \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -8.752115624$$

$$+ 0.5646787879 C - 0.004729386124 B - 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

$$+ 0.9606666665 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)$$

$$- \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753}$$

$$- \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.1680000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11}$$

$$- \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)$$

$$+ \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg],$$

$$\left[-9.039293773 + 0.5624242424 C - 0.004729386124 E + 1.395810631 (99 - A - B - C$$

$$-E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\ - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} - 0.2440973483 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99$$

$$- A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11}$$

$$- \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, 0.2327642571$$

$$- 0.009458772248 E - \frac{400 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$+ \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, -12.91224590$$

$$+ 0.5624242424 A - 0.002203401248 E$$

$$- \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$- \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{30283}$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$+ \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, 0.7995940264$$

$$- 0.002203401248 C - 0.009458772248 E - 0.004729386124 A - 0.009458772248 B$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{10 (19.21333333 A - 440.4656667) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& - \frac{10 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg], \\
& \left[-77.67018181 + 1.124848485 A + 0.562424242 B + 1.124848485 C + 0.5646787879 E \right. \\
& - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.6109090909 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& - \frac{10107}{2753} \left. \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& - \frac{10107}{2753} \left. \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -12.91224590 \\
& + 0.562424242 A - 0.002203401248 E \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{30283} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -26.04096969 \\
& + 1.124848485 A + 0.004509090908 E \\
& + \frac{4 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -13.03982069 \\
& + 0.5646787879 A - 0.002203401248 B + 0.004509090909 E + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.46566667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11} \\
& - \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)}{110} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg], \\
& \left[-8.752115624 + 0.5646787879 C - 0.004729386124 B - 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.9606666665 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \right. \\
& \left. - \frac{(19.21333333 A - 440.46566667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753} \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{10107}{2753} \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.1680000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, 0.7995940264 \\
& - 0.002203401248 C - 0.009458772248 E - 0.004729386124 A - 0.009458772248 B \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{10 (19.21333333 A - 440.4656667) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& - \frac{10 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, -13.03982069 \\
& + 0.5646787879 A - 0.002203401248 B + 0.004509090909 E + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)}{110} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, \\
& -0.009458772248 B + 0.4351626920 + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.213333333 A - 440.46566667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{10} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{10} \Bigg]
\end{aligned}$$

> $H := \text{evalf}(\text{subs}(\{A = 22.84662786, B = 49.44998188, C = 10.71809410, E = 72.67307411\}, H));$

$$H := \begin{bmatrix} 0.3292824967 & -162.3117504 & 26.22373762 & 4.293182881 \\ -162.3117504 & -0.00590155200 & -0.4111608333 & 0.02950690506 \\ 26.22373762 & -0.4111608333 & 0.00181926113 & 0.1412901185 \\ 4.293182881 & 0.02950690506 & 0.1412901185 & 0.004345838314 \end{bmatrix} \tag{5}$$

> $D1 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..1, 1..1));$
 $D2 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..2, 1..2));$
 $D3 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..3, 1..3));$

$$D1 := 0.3292824967$$

$$D2 := -26345.10626$$

$$D3 := 3456.221120 \tag{6}$$

>
>

> *with(LinearAlgebra);*

[&x, *Add, Adjoint, BackwardSubstitute, BandMatrix, Basis, BezoutMatrix, BidiagonalForm, BilinearForm, CARE, CharacteristicMatrix, CharacteristicPolynomial, Column, ColumnDimension, ColumnOperation, ColumnSpace, CompanionMatrix, CompressedSparseForm, ConditionNumber, ConstantMatrix, ConstantVector, Copy, CreatePermutation, CrossProduct, DARE, DeleteColumn, DeleteRow, Determinant, Diagonal, DiagonalMatrix, Dimension, Dimensions, DotProduct, EigenConditionNumbers, Eigenvalues, Eigenvectors, Equal, ForwardSubstitute, FrobeniusForm, FromCompressedSparseForm, FromSplitForm, GaussianElimination, GenerateEquations, GenerateMatrix, Generic, GetResultDataType, GetResultShape, GivensRotationMatrix, GramSchmidt, HankelMatrix, HermiteForm, HermitianTranspose, HessenbergForm, HilbertMatrix, HouseholderMatrix, IdentityMatrix, IntersectionBasis, IsDefinite, IsOrthogonal, IsSimilar, IsUnitary, JordanBlockMatrix, JordanForm, KroneckerProduct, LA_Main, LUdecomposition, LeastSquares, LinearSolve, LyapunovSolve, Map, Map2, MatrixAdd, MatrixExponential, MatrixFunction, MatrixInverse, MatrixMatrixMultiply, MatrixNorm, MatrixPower, MatrixScalarMultiply, MatrixVectorMultiply, MinimalPolynomial, Minor, Modular, Multiply, NoUserValue, Norm, Normalize, NullSpace, OuterProductMatrix, Permanent, Pivot, PopovForm, ProjectionMatrix, QRdecomposition, RandomMatrix, RandomVector, Rank, RationalCanonicalForm, ReducedRowEchelonForm, Row, RowDimension, RowOperation, RowSpace, ScalarMatrix, ScalarMultiply, ScalarVector, SchurForm, SingularValues, SmithForm, SplitForm, StronglyConnectedBlocks, SubMatrix, SubVector, SumBasis, SylvesterMatrix, SylvesterSolve, ToeplitzMatrix, Trace, Transpose, TridiagonalForm, UnitVector, VandermondeMatrix, VectorAdd, VectorAngle, VectorMatrixMultiply, VectorNorm, VectorScalarMultiply, ZeroMatrix, ZeroVector, Zip]*

(1)

> *with(VectorCalculus);*

[&x, `*`, `+`, `-', `.`; <, >, <|>, *About, AddCoordinates, ArcLength, BasisFormat, Binormal, ConvertVector, CrossProduct, Curl, Curvature, D, Del, DirectionalDiff, Divergence, DotProduct, Flux, GetCoordinateParameters, GetCoordinates, GetNames, GetPVDescription, GetRootPoint, GetSpace, Gradient, Hessian, IsPositionVector, IsRootedVector, IsVectorField, Jacobian, Laplacian, LineInt, MapToBasis, ∇ , Norm, Normalize, PathInt, PlotPositionVector, PlotVector, PositionVector, PrincipalNormal, RadiusOfCurvature, RootedVector, ScalarPotential, SetCoordinateParameters, SetCoordinates, SpaceCurve, SurfaceInt, TNBFrame, TangentLine, TangentPlane, TangentVector, Torsion, Vector, VectorField, VectorPotential, VectorSpace, Wronskian, diff, eval, evalVF, int, limit, series]*

(2)

(3)

$$\begin{aligned}
> H := \text{Hessian} & \left(270.6987747 - 9.813666666 A - 0.1401420269 B - 0.3177272727 C \right. \\
& - 0.4015500000 E - 0.192 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) + 0.272 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.351 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + 0.326 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) - 0.232 \left(\frac{40 A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) + 0.411 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} \right. \\
& \left. - \frac{3}{2} \right) + 1.302 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - 0.248 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.441 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.252 \left(\frac{40 A}{3} \right. \\
& \left. - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right), \\
& \left. [A, B, C, E] \right);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H := & \left[\left[-17.93939394 + 1.124848485 C - 38.42666666 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \right. \right. \quad (4) \\
& + 6.720000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right), -9.039293773 \\
& + 0.5624242424 C - 0.004729386124 E + 1.395810631 (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} \right. \\
& \left. - \frac{3}{2} \right) - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} - 0.2440973483 \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 \\
& - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)
\end{aligned}$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, -77.67018181$$

$$+ 1.124848485 A + 0.5624242424 B + 1.124848485 C + 0.5646787879 E$$

$$- 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.6109090909 \left(\frac{200B}{2753}$$

$$- \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753}$$

$$- \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

$$+ \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -8.752115624$$

$$+ 0.5646787879 C - 0.004729386124 B - 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

$$+ 0.9606666665 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)$$

$$- \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753}$$

$$- \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.1680000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11}$$

$$- \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)$$

$$+ \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg],$$

$$\left[-9.039293773 + 0.5624242424 C - 0.004729386124 E + 1.395810631 (99 - A - B - C$$

$$-E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\ - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} - 0.2440973483 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99$$

$$- A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11}$$

$$- \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, 0.2327642571$$

$$- 0.009458772248 E - \frac{400 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$+ \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}, -12.91224590$$

$$+ 0.5624242424 A - 0.002203401248 E$$

$$- \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$- \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{30283}$$

$$+ \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}$$

$$+ \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, 0.7995940264$$

$$- 0.002203401248 C - 0.009458772248 E - 0.004729386124 A - 0.009458772248 B$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{10 (19.21333333 A - 440.4656667) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& - \frac{10 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg], \\
& \left[-77.67018181 + 1.124848485 A + 0.562424242 B + 1.124848485 C + 0.5646787879 E \right. \\
& - 19.21333333 \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.6109090909 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& - \frac{10107}{2753} \left. \right) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 3.360000000 \left(\frac{200 B}{2753} \right. \\
& - \frac{10107}{2753} \left. \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -12.91224590 \\
& + 0.562424242 A - 0.002203401248 E \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{400 (3.360000000 A - 77.02800000) (99 - A - B - C - E) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{30283} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -26.04096969 \\
& + 1.124848485 A + 0.004509090908 E \\
& + \frac{4 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}, -13.03982069 \\
& + 0.5646787879 A - 0.002203401248 B + 0.004509090909 E + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.46566667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11} \\
& - \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)}{110} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20} \Bigg], \\
& \left[-8.752115624 + 0.5646787879 C - 0.004729386124 B - 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.9606666665 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E) \right. \\
& \left. - \frac{(19.21333333 A - 440.46566667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} + 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753} \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{10107}{2753} \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.1680000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} \right. \\
& \left. - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E) \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, 0.7995940264 \\
& - 0.002203401248 C - 0.009458772248 E - 0.004729386124 A - 0.009458772248 B \\
& - \frac{200 (19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& + \frac{10 (19.21333333 A - 440.4656667) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{200 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{2753} \\
& - \frac{10 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (99 - A - B - C - E)}{2753} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, -13.03982069 \\
& + 0.5646787879 A - 0.002203401248 B + 0.004509090909 E + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{20} \\
& + \frac{2 (3.360000000 A - 77.02800000) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)}{11}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (99 - A - B - C - E)}{110} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{20}, \\
& -0.009458772248 B + 0.4351626920 + 0.004509090908 C \\
& - \frac{(19.21333333 A - 440.4656667) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right)}{10} \\
& + \frac{(3.360000000 A - 77.028000000) \left(\frac{200 B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2 C}{11} - \frac{19}{11} \right)}{10} \Bigg]
\end{aligned}$$

> $H := \text{evalf}(\text{subs}(\{A=34.56944394, B=12.13313578, C=29.39792289, E=22.71687863\}, H));$

$$H := \begin{bmatrix} 0.78894475 & 2.357453116 & 13.87886273 & 11.90464860 \\ 2.357453116 & 4.366112099 & 15.91588713 & 13.93379191 \\ 13.87886273 & 15.91588713 & 27.40088037 & 25.56077357 \\ 11.90464860 & 13.93379191 & 25.56077357 & 23.37991385 \end{bmatrix}$$

(5)

> $D1 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..1, 1..1));$
 $D2 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..2, 1..2));$
 $D3 := \text{Determinant}(\text{SubMatrix}(H, 1..3, 1..3));$

$$\begin{aligned}
D1 & := 0.78894475 \\
D2 & := -2.112963976 \\
D3 & := -57.2654064
\end{aligned}$$

(6)

Додаток Д

Оптимальні значення параметрів моделі

```
> restart:
> f := (A, B, C, K, E) -> 251.9987747 - 9.626666666*A +
0.04685797312*B - 0.1307272727*C + 0.187*K - 0.2145500000*E
>   - 0.192*((40*A)/3 - 917/3)*((200*B)/2753 - 10107/2753)
>   + 0.272*((40*A)/3 - 917/3)*(K - 1)
>   + 0.351*((200*B)/2753 - 10107/2753)*(K - 1)
>   + 0.326*((2*C)/11 - 19/11)*(K - 1)
>   - 0.232*((40*A)/3 - 917/3)*((2*C)/11 - 19/11)*(K - 1)
>   + 0.411*((200*B)/2753 - 10107/2753)*((2*C)/11 - 19/11)*(E/20
- 3/2)
>   + 1.302*((200*B)/2753 - 10107/2753)*(K - 1)*(E/20 - 3/2)
>   - 0.248*((2*C)/11 - 19/11)*(K - 1)*(E/20 - 3/2)
>   + 1.441*((40*A)/3 - 917/3)*((200*B)/2753 - 10107/2753)*(K -
1)*(E/20 - 3/2)
>   - 0.252*((40*A)/3 - 917/3)*((200*B)/2753 - 10107/2753)*((2*C)
/11 - 19/11)*(K - 1)*(E/20 - 3/2):
> A := 'A': B := 'B': C := 'C': K := 'K': E := 'E':
> df_dA := diff(f(A, B, C, K, E), A):
> df_dB := diff(f(A, B, C, K, E), B):
> df_dC := diff(f(A, B, C, K, E), C):
> df_dK := diff(f(A, B, C, K, E), K):
> df_dE := diff(f(A, B, C, K, E), E):
> print("Partial derivative with respect to A:"):
> print(df_dA):
> print(""):
> print("Partial derivative with respect to B:"):
> print(df_dB):
> print(""):
> print("Partial derivative with respect to C:"):
> print(df_dC):
> print(""):
> print("Partial derivative with respect to K:"):
> print(df_dK):
> print(""):
> print("Partial derivative with respect to E:"):
> print(df_dE):
> print(""):
> GradientAscent := proc(f_func, A0, B0, C0, K0, E0, alpha,
max_iter, sum_constraint)
>   local A_current, B_current, C_current, K_current, E_current;
>   local grad_A, grad_B, grad_C, grad_K, grad_E, i, results;
>   local f_current, A_next, B_next, C_next, K_next, E_next;
>   local df_A_expr, df_B_expr, df_C_expr, df_K_expr, df_E_expr,
scale_factor;
>   local f_max, A_max, B_max, C_max, K_max, E_max, iter_max,
sum_current;
>
>   # Pre-compute derivative expressions
>   df_A_expr := unapply(df_dA, A, B, C, K, E):
>   df_B_expr := unapply(df_dB, A, B, C, K, E):
>   df_C_expr := unapply(df_dC, A, B, C, K, E):
>   df_K_expr := unapply(df_dK, A, B, C, K, E):
>   df_E_expr := unapply(df_dE, A, B, C, K, E):
>   sum_current := A0 + B0 + C0 + K0 + E0:
>   scale_factor := sum_constraint / sum_current:
```

```

>   A_current := A0 * scale_factor:
>   B_current := B0 * scale_factor:
>   C_current := C0 * scale_factor:
>   K_current := K0 * scale_factor:
>   E_current := E0 * scale_factor:

>   results := Array(1..max_iter+1, 1..7): # Store iteration, A,
B, C, K, E, f(A,B,C,K,E)
>   results[1, 1] := 0:
>   results[1, 2] := A_current:
>   results[1, 3] := B_current:
>   results[1, 4] := C_current:
>   results[1, 5] := K_current:
>   results[1, 6] := E_current:
>   results[1, 7] := evalf(f_func(A_current, B_current,
C_current, K_current, E_current)):
>   f_max := results[1, 7]:
>   A_max := A_current:
>   B_max := B_current:
>   C_max := C_current:
>   K_max := K_current:
>   E_max := E_current:
>   iter_max := 0:

>   sum_current := A_current + B_current + C_current + K_current
+ E_current:
>   printf("Iteration %3d: A=%8.4f, B=%8.4f, C=%8.4f, K=%8.4f, E=
%8.4f, f=%12.6f, sum=%8.4f\n",
>   0, A_current, B_current, C_current, K_current,
E_current, results[1, 7], sum_current):
>   for i from 1 to max_iter do
>     grad_A := evalf(df_A_expr(A_current, B_current,
C_current, K_current, E_current)):
>     grad_B := evalf(df_B_expr(A_current, B_current,
C_current, K_current, E_current)):
>     grad_C := evalf(df_C_expr(A_current, B_current,
C_current, K_current, E_current)):
>     grad_K := evalf(df_K_expr(A_current, B_current,
C_current, K_current, E_current)):
>     grad_E := evalf(df_E_expr(A_current, B_current,
C_current, K_current, E_current)):
>     local dot_product, proj_grad_A, proj_grad_B, proj_grad_C,
proj_grad_K, proj_grad_E:
>     dot_product := grad_A + grad_B + grad_C + grad_K +
grad_E:
>     proj_grad_A := grad_A - dot_product / 5:
>     proj_grad_B := grad_B - dot_product / 5:
>     proj_grad_C := grad_C - dot_product / 5:
>     proj_grad_K := grad_K - dot_product / 5:
>     proj_grad_E := grad_E - dot_product / 5:
>     A_next := A_current + alpha * proj_grad_A:
>     B_next := B_current + alpha * proj_grad_B:
>     C_next := C_current + alpha * proj_grad_C:
>     K_next := K_current + alpha * proj_grad_K:
>     E_next := E_current + alpha * proj_grad_E:
>     if A_next < 0 then A_next := 0: end if:
>     if B_next < 0 then B_next := 0: end if:

```

```

>         if C_next < 0 then C_next := 0: end if:
>         if K_next < 0 then K_next := 0: end if:
>         if E_next < 0 then E_next := 0: end if:
>         sum_current := A_next + B_next + C_next + K_next +
E_next:
>         if sum_current > 0 then
>             scale_factor := sum_constraint / sum_current:
>             A_next := A_next * scale_factor:
>             B_next := B_next * scale_factor:
>             C_next := C_next * scale_factor:
>             K_next := K_next * scale_factor:
>             E_next := E_next * scale_factor:
>         end if:
>         A_current := A_next:
>         B_current := B_next:
>         C_current := C_next:
>         K_current := K_next:
>         E_current := E_next:
>         f_current := evalf(f_func(A_current, B_current,
C_current, K_current, E_current)):
>         results[i+1, 1] := i:
>         results[i+1, 2] := A_current:
>         results[i+1, 3] := B_current:
>         results[i+1, 4] := C_current:
>         results[i+1, 5] := K_current:
>         results[i+1, 6] := E_current:
>         results[i+1, 7] := f_current:
>         if f_current > f_max then
>             f_max := f_current:
>             A_max := A_current:
>             B_max := B_current:
>             C_max := C_current:
>             K_max := K_current:
>             E_max := E_current:
>             iter_max := i:
>         end if:
>
>         sum_current := A_current + B_current + C_current +
K_current + E_current:
>         printf("Iteration %3d: A=%8.4f, B=%8.4f, C=%8.4f, K=
%8.4f, E=%8.4f, f=%12.6f, sum=%8.4f\n",
>             i, A_current, B_current, C_current, K_current,
E_current, f_current, sum_current):
>     end do:
>
>     print(""):
>     print("====="):
>     print("Final Results:"):
>     print("====="):
>     printf("Maximum A = %12.8f (at iteration %d)\n", A_max,
iter_max):
>     printf("Maximum B = %12.8f (at iteration %d)\n", B_max,
iter_max):
>     printf("Maximum C = %12.8f (at iteration %d)\n", C_max,
iter_max):
>     printf("Maximum K = %12.8f (at iteration %d)\n", K_max,
iter_max):

```

```

>     printf("Maximum E = %12.8f (at iteration %d)\n", E_max,
iter_max):
>     printf("Maximum f(A,B,C,K,E) = %12.8f (at iteration %d)\n",
f_max, iter_max):
>     printf("A + B + C + K + E = %12.8f (constraint: = %12.8f)\n",
A_max + B_max + C_max + K_max + E_max, sum_constraint):
>     print(""):

>     return results:
> end proc:
> print("====="):
> print("Starting Gradient Ascent Optimization"):
> print("====="):

> A0 := 21:
> B0 := 56:
> C0 := 6:
> K0 := 2:
> E0 := 15:
> alpha := 0.01:
> max_iter := 100:
> sum_constraint := 100:

> printf("Initial values: A = %g, B = %g, C = %g, K = %g, E =
%g\n", A0, B0, C0, K0, E0):
> printf("Step size (alpha) = %g\n", alpha):
> printf("Maximum iterations = %d\n", max_iter):
> printf("Constraint: A + B + C + K + E = %g (always exactly %g)
\n", sum_constraint, sum_constraint):
> print(""):

> results := GradientAscent(f, A0, B0, C0, K0, E0, alpha, max_iter,
sum_constraint):

> print("====="):
> print("Verification with Maple Optimization:"):
> print("====="):
> with(Optimization):
> A := 'A': B := 'B': C := 'C': K := 'K': E := 'E':
> obj := -f(A, B, C, K, E): # Minimize negative = Maximize
positive
> sol := NLPSolve(obj, {A >= 0, B >= 0, C >= 0, K >= 0, E >= 0, A +
B + C + K + E = sum_constraint}):
> print("Maple's NLPSolve result:"):
> print(sol):

```

"Partial derivative with respect to A:"

$$\begin{aligned}
& -3.854888001 - 0.1859789321 B + 3.626666667 K - 3.093333333 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (K-1) \\
& + 19.21333333 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (K-1) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 3.360000000 \left(\frac{200B}{2753} \right. \\
& \left. - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (K-1) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)
\end{aligned}$$

""

"Partial derivative with respect to B:"

$$4.284925536 - 0.1859789321 A + 0.02549945514 K + 0.02985833636 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.09458772248 (K - 1) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 0.1046857973 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) (K - 1) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.01830730113 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (K - 1) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

""

"Partial derivative with respect to C:"

$$-0.1900000000 + 0.05927272727 K - 0.04218181818 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) (K - 1) + 0.07472727273 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.04509090909 (K - 1) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.04581818182 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (K - 1) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

""

"Partial derivative with respect to K:"

$$-84.80603921 + 3.626666667 A + 0.02549945514 B + 0.05927272727 C - 0.232 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) + 1.302 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.248 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) + 1.441 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right) - 0.252 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) \left(\frac{E}{20} - \frac{3}{2} \right)$$

""

"Partial derivative with respect to E:"

$$-0.2145500000 + 0.02055000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) + 0.06510000000 \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (K - 1) - 0.01240000000 \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (K - 1) + 0.07205000000 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) (K - 1) - 0.01260000000 \left(\frac{40A}{3} - \frac{917}{3} \right) \left(\frac{200B}{2753} - \frac{10107}{2753} \right) \left(\frac{2C}{11} - \frac{19}{11} \right) (K - 1)$$

""

"=====

"Starting Gradient Ascent Optimization"

"=====

Initial values: A = 21, B = 56, C = 6, K = 2, E = 15
Step size (alpha) = 0.01
Maximum iterations = 100
Constraint: A + B + C + K + E = 100 (always exactly 100)

""

Iteration	0:	A= 21.0000,	B= 56.0000,	C= 6.0000,	K= 2.0000,	E= 15.0000,	f= 51.762469,	sum=100.0000
Iteration	1:	A= 20.9020,	B= 56.0422,	C= 6.0228,	K= 2.0269,	E= 15.0061,	f= 53.039668,	sum=100.0000
Iteration	2:	A= 20.8026,	B= 56.0858,	C= 6.0456,	K= 2.0551,	E= 15.0109,	f= 54.363404,	sum=100.0000
Iteration	3:	A= 20.7017,	B= 56.1308,	C= 6.0685,	K= 2.0847,	E= 15.0143,	f= 55.738634,	sum=100.0000
Iteration	4:	A= 20.5992,	B= 56.1773,	C= 6.0913,	K= 2.1159,	E= 15.0163,	f= 57.171001,	sum=100.0000
Iteration	5:	A= 20.4949,	B= 56.2254,	C= 6.1141,	K= 2.1488,	E= 15.0168,	f= 58.666950,	sum=100.0000
Iteration	6:	A= 20.3888,	B= 56.2752,	C= 6.1369,	K= 2.1836,	E= 15.0156,	f= 60.233869,	sum=100.0000
Iteration	7:	A= 20.2806,	B= 56.3268,	C= 6.1597,	K= 2.2204,	E= 15.0125,	f= 61.880255,	sum=100.0000
Iteration	8:	A= 20.1702,	B= 56.3804,	C= 6.1825,	K= 2.2594,	E= 15.0076,	f= 63.615919,	sum=100.0000
Iteration	9:	A= 20.0574,	B= 56.4360,	C= 6.2052,	K= 2.3008,	E= 15.0005,	f= 65.452234,	sum=100.0000
Iteration	10:	A= 19.9421,	B= 56.4939,	C= 6.2279,	K= 2.3449,	E= 14.9912,	f= 67.402433,	sum=100.0000
Iteration	11:	A= 19.8239,	B= 56.5542,	C= 6.2506,	K= 2.3918,	E= 14.9794,	f= 69.481983,	sum=100.0000
Iteration	12:	A= 19.7028,	B= 56.6171,	C= 6.2732,	K= 2.4419,	E= 14.9650,	f= 71.709043,	sum=100.0000
Iteration	13:	A= 19.5782,	B= 56.6828,	C= 6.2958,	K= 2.4955,	E= 14.9476,	f= 74.105035,	sum=100.0000
Iteration	14:	A= 19.4501,	B= 56.7517,	C= 6.3183,	K= 2.5528,	E= 14.9271,	f= 76.695353,	sum=100.0000
Iteration	15:	A= 19.3179,	B= 56.8240,	C= 6.3407,	K= 2.6143,	E= 14.9031,	f= 79.510267,	sum=100.0000
Iteration	16:	A= 19.1814,	B= 56.8999,	C= 6.3630,	K= 2.6804,	E= 14.8753,	f= 82.586068,	sum=100.0000
Iteration	17:	A= 19.0400,	B= 56.9800,	C= 6.3853,	K= 2.7515,	E= 14.8433,	f= 85.966527,	sum=100.0000
Iteration	18:	A= 18.8933,	B= 57.0647,	C= 6.4074,	K= 2.8281,	E= 14.8066,	f= 89.704792,	sum=100.0000
Iteration	19:	A= 18.7405,	B= 57.1544,	C= 6.4293,	K= 2.9109,	E= 14.7648,	f= 93.865853,	sum=100.0000
Iteration	20:	A= 18.5812,	B= 57.2497,	C= 6.4512,	K= 3.0006,	E= 14.7173,	f= 98.529787,	sum=100.0000
Iteration	21:	A= 18.4144,	B= 57.3514,	C= 6.4728,	K= 3.0980,	E= 14.6635,	f= 103.796082,	sum=100.0000
Iteration	22:	A= 18.2392,	B= 57.4602,	C= 6.4942,	K= 3.2039,	E= 14.6025,	f= 109.789447,	sum=100.0000

Iteration 23: A= 18.0545, B= 57.5770, C= 6.5153, K= 3.3196, E=
14.5335, f= 116.667741, sum=100.0000
Iteration 24: A= 17.8592, B= 57.7031, C= 6.5361, K= 3.4462, E=
14.4554, f= 124.632906, sum=100.0000
Iteration 25: A= 17.6515, B= 57.8396, C= 6.5565, K= 3.5854, E=
14.3670, f= 133.946304, sum=100.0000
Iteration 26: A= 17.4298, B= 57.9883, C= 6.5763, K= 3.7389, E=
14.2667, f= 144.950553, sum=100.0000
Iteration 27: A= 17.1917, B= 58.1511, C= 6.5955, K= 3.9089, E=
14.1528, f= 158.101166, sum=100.0000
Iteration 28: A= 16.9347, B= 58.3304, C= 6.6137, K= 4.0982, E=
14.0230, f= 174.013332, sum=100.0000
Iteration 29: A= 16.6552, B= 58.5293, C= 6.6308, K= 4.3101, E=
13.8746, f= 193.532568, sum=100.0000
Iteration 30: A= 16.3493, B= 58.7514, C= 6.6464, K= 4.5488, E=
13.7042, f= 217.844060, sum=100.0000
Iteration 31: A= 16.0115, B= 59.0016, C= 6.6598, K= 4.8197, E=
13.5074, f= 248.646589, sum=100.0000
Iteration 32: A= 15.6350, B= 59.2864, C= 6.6703, K= 5.1297, E=
13.2787, f= 288.437879, sum=100.0000
Iteration 33: A= 15.2108, B= 59.6139, C= 6.6768, K= 5.4878, E=
13.0106, f= 340.999733, sum=100.0000
Iteration 34: A= 14.7271, B= 59.9955, C= 6.6775, K= 5.9065, E=
12.6934, f= 412.257406, sum=100.0000
Iteration 35: A= 14.1671, B= 60.4471, C= 6.6697, K= 6.4027, E=
12.3134, f= 511.876974, sum=100.0000
Iteration 36: A= 13.5077, B= 60.9913, C= 6.6492, K= 7.0008, E=
11.8511, f= 656.408847, sum=100.0000
Iteration 37: A= 12.7146, B= 61.6620, C= 6.6088, K= 7.7368, E=
11.2780, f= 875.915111, sum=100.0000
Iteration 38: A= 11.7354, B= 62.5121, C= 6.5360, K= 8.6667, E=
10.5498, f= 1229.178935, sum=100.0000
Iteration 39: A= 10.4855, B= 63.6295, C= 6.4078, K= 9.8826, E=
9.5946, f= 1842.561059, sum=100.0000
Iteration 40: A= 8.8182, B= 65.1711, C= 6.1773, K= 11.5482, E=
8.2853, f= 3024.214246, sum=100.0000
Iteration 41: A= 6.4525, B= 67.4483, C= 5.7390, K= 13.9846, E=
6.3756, f= 5670.893547, sum=100.0000
Iteration 42: A= 2.7738, B= 71.1739, C= 4.8150, K= 17.9218, E=
3.3154, f=13187.908010, sum=100.0000
Iteration 43: A= 0.0000, B= 73.7444, C= 2.3315, K= 23.9240, E=
0.0000, f=27610.974910, sum=100.0000
Iteration 44: A= 0.0000, B= 70.7547, C= 0.0000, K= 29.2453, E=
0.0000, f=30132.671900, sum=100.0000
Iteration 45: A= 0.0000, B= 68.8536, C= 0.0000, K= 31.1464, E=
0.0000, f=28554.245060, sum=100.0000
Iteration 46: A= 0.0000, B= 68.3912, C= 0.0000, K= 31.6088, E=
0.0000, f=28102.205940, sum=100.0000
Iteration 47: A= 0.0000, B= 68.2820, C= 0.0000, K= 31.7180, E=
0.0000, f=27991.546180, sum=100.0000
Iteration 48: A= 0.0000, B= 68.2564, C= 0.0000, K= 31.7436, E=
0.0000, f=27965.375840, sum=100.0000
Iteration 49: A= 0.0000, B= 68.2504, C= 0.0000, K= 31.7496, E=
0.0000, f=27959.235990, sum=100.0000
Iteration 50: A= 0.0000, B= 68.2490, C= 0.0000, K= 31.7510, E=
0.0000, f=27957.798140, sum=100.0000
Iteration 51: A= 0.0000, B= 68.2487, C= 0.0000, K= 31.7513, E=

Iteration 80: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358750, sum=100.0000
Iteration 81: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358700, sum=100.0000
Iteration 82: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358670, sum=100.0000
Iteration 83: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358720, sum=100.0000
Iteration 84: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358690, sum=100.0000
Iteration 85: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358750, sum=100.0000
Iteration 86: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358700, sum=100.0000
Iteration 87: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358670, sum=100.0000
Iteration 88: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358720, sum=100.0000
Iteration 89: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358690, sum=100.0000
Iteration 90: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358750, sum=100.0000
Iteration 91: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358700, sum=100.0000
Iteration 92: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358670, sum=100.0000
Iteration 93: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358720, sum=100.0000
Iteration 94: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358690, sum=100.0000
Iteration 95: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358750, sum=100.0000
Iteration 96: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358700, sum=100.0000
Iteration 97: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358670, sum=100.0000
Iteration 98: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358720, sum=100.0000
Iteration 99: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358690, sum=100.0000
Iteration 100: A= 0.0000, B= 68.2486, C= 0.0000, K= 31.7514, E= 0.0000, f=27957.358750, sum=100.0000

""

"=====

"Final Results:"

"=====

Maximum A = 0.00000000 (at iteration 44)
Maximum B = 70.75466994 (at iteration 44)
Maximum C = 0.00000000 (at iteration 44)
Maximum K = 29.24533005 (at iteration 44)
Maximum E = 0.00000000 (at iteration 44)
Maximum f(A,B,C,K,E) = 30132.67190000 (at iteration 44)
A + B + C + K + E = 99.99999999 (constraint: = 100.00000000)

""

"=====

"Verification with Maple Optimization:"

"=====

"Maple's NLPSolve result:"

[-118023.871668651220, [$A = 1.51195191556676 \times 10^{-16}$, $B = -4.68199079145841 \times 10^{-15}$, C (**1**)
= 0., $E = 65.4861676285469$, $K = 34.5138323714531$]]

[>

Використання промислових котлів для об'єктів малої енергетики



▲ Котельня на МГФ у Кориньському. Фундаментальні речі в роботі котельні: очищення води, насоси підкачки, безперервне живлення.



На обох майданчиках використовують альтернативні джерела палива. У Понорах для нагріву води працювали електричні бойлери, які споживали 70 кВт електроенергії. Із зміною теплопостачальним котлом, який окрім нагріву води для доїльного обладнання (5400 л до 85 °С) та душних, обігрівав побутові приміщення. Заощадження становить до 70 кВт. Як паливо використовуються відсортовані відходи, деревина від прорідження посадок, частково докупуються дрова. Окупність системи 7 місяців.

Займатися молочним скотарством цікаво. Ти постійно в роботі, в турботах і думках, що це потрібно зробити, як сучасні технології вписати в стару інфраструктуру, фізично не виходячи за її межі. Ми постійно в пошуку нетипових рішень для типових приміщень старого зразка. Якщо є каркас, чому його не використати? Бетонні роботи будуть завжди — і при будівництві з нуля і при реконструкції. І на це треба витратитися. Можливо, реконструйовані приміщення виглядають не дуже естетично, для нас головне, щоб це працю-

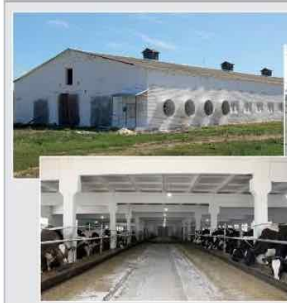
вало і корова була здорова. Тільки здорова корова приносить прибуток. До речі, не наймасштабніший будівельний компаній, а лише інженера, який розробляє проєкт згідно наших вимог, і в центрі уваги, як я вже згадував, максимально комфортні умови для тварин. Усі роботи виконує власна бригада, що дозволяє майже ідеально здійснити будівельні роботи. Чому на майданчику в Кориньському вирішили йти у безприв'яз? — Там теж старі приміщення. Ферму придбали за кілька днів до

повномасштабного вторгнення як майданчик для виробництва ремонтного мазодняка, бо в Понорах худоби було загінто. Потім була окупація, страх, зменшення поголів'я. Через рік оголошили і вже в нових реаліях почали шукати ідеї, як використати майданчик. Вирішили, що найкраще буде реконструювати його під виробництво молока. Що стосується способу утримання, то є три основні типи: прив'язь, безприв'яз і роботи. Коли стикаєшся з людським фактором — нестачею працівників або ставленням



▲ Виглядний майданчик для хімії раннього сукостю (Кориньське).

▲ Корівник №1 (Кориньське) на 96 корів. Приміщення повністю реконструйоване, встановлено автоматизовану систему забезпечення мікроклімату і гравітаційна.



▲ Корівник №2 (Кориньське) для новонапілних і пильного сукостю. Реконструкцію на завершено, проте встановлено турбулентну вентиляцію й охолоджувальні панелі.

до роботи, — то одразу хочеться поставити роботи. Коли ж починаєш рахувати інвестиції і розумієш, що все-таки краще домовитися із людьми, вчити, привозити. Найоптимальнішим варіантом у нашому разі виявилася безприв'язь. Знайшлася і доїльна зала, що була у використанні, але в чудовому стані, і їдє не в чотири рази дешевша порівняно з новою. Реконструкція стартувала у 2023-му. Приміщення були напіваруїновані, в корівниках росли дерева. Спочатку зробили корівник №1 і доїльну залу, навів для раннього і пильного сукостю, згодом пильної сухості перемістили в корівник №2.

У першому повністю реконструйованому приміщенні утримуємо 96 дійних корів. Тут усе зроблено для їхнього максимального комфорту і, відповідно, максимальної продуктивності: широкий кормовий прохід, зручні стійла, на кожну групу з 24 корів встановлено 2 поїлки. Вентиляційні тунелі, працює в автоматичному режимі. В одному кінці приміщення розміщено потужні випірні вентилятори, які витягують забруднене повітря, а іншого боку — випарувальні панелі, через які в корівник надходить свіже охолоджене повітря.

Що помітиш? На обох майданчиках згодуюмо однаковий раціон, але різниця в молочній продуктивності відчутна — на 1,5-2 л на корову на добу більше на безприв'язі. Середній добовий надій становить 43-44 л.

У другому корівнику — для новонапілних і пильного сукостю — реконструкцію не завершено, проте встановлено систему вентилявання й охолодження. Можна було спочатку забетонувати, обладнати стійла й проходи, але комфорту шим не додали, відповідно, не отримавш молоко. Наразі все, що потрібно, корови мають: достатньо підстилки з соломи, яка прибирається й оновлюється двічі на тиждень, достатньо корму і води, часте прохолодне повітря. Згодом плануємо забетонувати один бік приміщення, потім інший.

У планах також майданчик для пильного сукостю. Ділянку вже розчистили, сподіваємь, до кінця цього року завершимо будівництво. Ще стосується годівлі, то раціон однаковий для всіх корів, розробляється технологічно, тутується в Понорах, у Кориньському лише роздається. Плануємо, що з осені, коли буде створено запас основних кормів, майданчик почне працювати автономно.

Ветслужба одна на два відділки, працює згідно протоколів — профілактика, діагностика, оглядення. — Що в планах?

Інвестиції у вентилявання й охолодження корів дуже швидко окуплюються. Знайти гроші, щоб залити бетоном 3 тис. квадратів у корівнику, але економити на вентиляції — неправильно. Корові у першу чергу потрібне свіже повітря, а в спеку ще й охолодження.

Рис. Е.1 – ТОВ «Понори»