

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЧУПА ВОЛОДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

УДК [504:628.474](043.3)(477.86)

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ
ВІДХОДІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ
(НА ПРИКЛАДІ ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ)**

Спеціальність 101 – «Екологія»

Галузь знань 10 – «Природничі науки»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

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

_____ В. М. Чупа

Науковий керівник
Адаменко Ярослав Олегович
доктор технічних наук, професор

ІВАНО – ФРАНКІВСЬК – 2024

АНОТАЦІЯ

Чуна В. М. Удосконалення методів та технологій переробки відходів для відновлювальної енергії (на прикладі Івано-Франківської області). – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 – «Екологія», галузь знань 10 – «Природничі науки» Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2024.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню, яке зосереджується на екологічних засадах удосконалення методів та технологій переробки відходів для відновлювальної енергії.

Івано-Франківська область займає територію на південно-заході України, маючи площу 13,9 тисяч квадратних кілометрів, що є 2,4% загальної площі країни, і розміщується на 22-му місці за розмірами серед інших областей. В регіоні проживає 1 364,7 тисячі людей. Івано-Франківськ є центром області, виступаючи як важливий економічний та культурний вузол Прикарпаття.

Важливість впровадження циркулярної економіки в контексті управління відходами в Івано-Франківській області. Акцент на потребі мінімізації відходів та їх перетворення на цінні ресурси. Цей підхід передбачає створення замкнутої системи, де продукти, матеріали та ресурси зберігають свою цінність якомога довше, зменшуючи тим самим потребу в нових ресурсах та викидах відходів до мінімуму. Аналізуючи потенціал та виклики впровадження циркулярних методів у регіональні системи управління відходами, автор вказує на необхідність реформ у законодавстві, підвищення обізнаності серед населення та залучення приватного сектору до інвестування у новітні технології переробки відходів.

Проблема управління відходами, особливо в контексті збільшення обсягів побутових відходів в Україні, стала ще більш актуальною на тлі військових дій. Це призвело до значного накопичення відходів у західних

областях через приплив внутрішньо переміщених осіб, негативно впливаючи на довкілля та соціальний стан. Українське законодавство передбачає комплекс заходів щодо управління відходами, включаючи їх запобігання, рециклінг, відновлення, та видалення, проте практика сортування залишається недостатньою. Особливі труднощі виникають у малих населених пунктах, де відсутні умови для ефективного управління відходами, що часто призводить до стихійного засмічення та спалювання відходів.

Актуальність дослідження полягає в розробці новітніх методів та технологій для перетворення побутових відходів на термічну енергію, що не тільки сприятиме зменшенню негативного впливу відходів на довкілля, але й забезпечить отримання відновлюваної енергії. Використання сучасних ІТ-технологій, зокрема нейронних мереж та штучного інтелекту, відкриває нові можливості для оптимізації складу побутових відходів, комбінуючи їх з екологічно чистими джерелами палива, такими як енергетичні культури і твердопаливні пелети.

Використали різноманітні тверді побутові відходи у композиціях із твердопаливними деревними пелетами для вирішення проблеми енергетичного характеру: дрібних та середніх споживачів (де використовується процес низькотемпературного спалювання), а також зменшити обсяги нагромадження відходів і в той же час з мінімальним впливом на навколишнє природне середовище. Досліджували різні типи відходів та пелет включаючи аналіз калорійності сумішей твердих побутових відходів різних типів: пластик, гуму, текстиль, біовідходи, дерево, папір та несортований горючий матеріал, спільно з твердопаливними деревними пелетами. Дослідження дисертаційної роботи проводилися на території полігонів твердих побутових відходів в Івано-Франківській області, зокрема на території КП «Полігон ТПВ» с. Рибне. Дослідження включало розрахунок оптимальних концентрацій різних видів твердих побутових відходів та твердопаливних деревних пелет для максимально ефективного використання їх як джерела енергії.

Аналіз різних типів відходів, властивостей твердопаливних деревних пелет, розробку оптимальної композиції паливної суміші, вивчення енергетичних та екологічних параметрів процесу переробки, таких як викиди в атмосферне повітря та елементарний склад золи, використання нейронної мережі для оптимізації та полегшення розробки моделі розрахунку оптимальних паливних композицій з метою забезпечення екологічної стійкості та безпеки процесу переробки.

Використання штучних нейронних мереж для розрахунку найкращих концентрацій та співвідношень компонентів паливних сумішей є інноваційним підходом, що дозволило досягти максимальної точності розрахунку відсоткових сумішей паливної композиції.

Дослідили та удосконалили методи та технології переробки відходів для відновлювальної енергії є не тільки актуальним, але і надзвичайно важливим з точки зору сталого розвитку та захисту довкілля.

Розробили більш ефективні методи та технології термічної переробки побутових відходів з метою отримання енергії.

Розроблені паливні композиції, що базуються на побутових відходах, вирізняються високим термічним потенціалом та мінімальним впливом на навколишнє середовище, що робить їх перспективними для використання у генерації енергії. Пропозиції, викладені в дисертаційній роботі, отримали всебічне наукове підтвердження і можуть внести значний вклад у вирішення проблеми управління відходами в Україні.

Важливою науковою новизною є підхід до забезпечення сталого розвитку та зменшення негативного впливу на довкілля шляхом використання твердих побутових відходів як джерела енергії. Ця робота сприяє збереженню природних ресурсів та зменшенню викидів в атмосферу.

В кінцевому підсумку, дисертація пропонує комплексний підхід до розв'язання проблеми управління відходами в Івано-Франківській області, включаючи в себе не тільки технологічні інновації, але й соціально-економічні та законодавчі зміни. Автор наголошує на важливості міжсекторальної

взаємодії між державою, бізнесом та громадськістю для досягнення сталого розвитку та забезпечення екологічної безпеки. Рекомендації з дисертації вказують на потребу в розробці інтегрованих стратегій, які б враховували локальні особливості Івано-Франківської області, та сприяли б залученню інвестицій в сектор відновлювальної енергії і переробки відходів.

Ключові слова: управління відходами, побутові відходи, переробка відходів, відходи в енергію, стратегія поводження з відходами, екологічна безпека, зола.

ABSTRACTS

Chupa V. M. Improvement of methods and technologies of waste processing for renewable energy (on the example of Ivano-Frankivsk region) - Qualification scientific work on the rights of manuscript

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 101 - "Ecology", field of knowledge 10 - "Natural Sciences" Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2024.

The qualification work is devoted to a study that focuses on the environmental principles of improving methods and technologies for waste processing for renewable energy.

Ivano-Frankivsk region occupies an area in the southwest of Ukraine with an area of 13.9 thousand square kilometres, which is 2.4% of the total area of the country, and is ranked 22nd in size among other regions. The region is home to 1,364.7 thousand people. Ivano-Frankivsk is the centre of the region, acting as an important economic and cultural hub of the Carpathian region.

The importance of implementing a circular economy in the context of waste management in Ivano-Frankivsk region. Emphasis on the need to minimize waste and turn it into valuable resources. This approach involves the creation of a closed system where products, materials and resources retain their value as long as possible, thereby reducing the need for new resources and minimizing waste emissions. Analysing the potential and challenges of introducing circular methods into regional waste management systems, the author points out the need for legislative reforms, raising awareness among the population, and attracting the private sector to invest in the latest waste treatment technologies.

The problem of waste management, especially in the context of increasing household waste in Ukraine, has become even more urgent amid the military operations. This has led to a significant accumulation of waste in the western regions due to the influx of internally displaced persons, negatively impacting the environment and social conditions. Ukrainian legislation provides for a range of

waste management measures, including waste prevention, recycling, recovery, and disposal, but the practice of sorting remains insufficient. Particular difficulties arise in small settlements, where there are no conditions for effective waste management, which often leads to spontaneous dumping and burning of waste.

The relevance of the study is to develop the latest methods and technologies for converting household waste into thermal energy, which will not only help reduce the negative impact of waste on the environment but also provide renewable energy. The use of modern IT technologies, such as neural networks and artificial intelligence, opens up new opportunities for optimizing the composition of household waste by combining it with environmentally friendly fuel sources, such as energy crops and solid fuel pellets.

We used a variety of municipal solid waste in compositions with solid wood pellets to solve the energy problem of small and medium-sized consumers (where the low-temperature combustion process is used), as well as to reduce the volume of waste accumulation and at the same time with minimal impact on the environment. Various types of waste and pellets were studied, including the analysis of the caloric content of mixtures of solid waste of various types: plastic, rubber, textiles, bio-waste, wood, paper and unsorted combustible material, together with solid wood pellets. The research of the dissertation was carried out on the territory of solid waste landfills in Ivano-Frankivsk region, in particular on the territory of the Municipal Enterprise "Landfill" in Rybne village. Rybne. The study included the calculation of the optimal concentrations of various types of solid waste and solid wood pellets for the most efficient use of them as an energy source.

Analysis of various types of waste, properties of solid wood pellets, development of the optimal fuel mixture composition, study of energy and environmental parameters of the processing process, such as air emissions and elemental composition of ash, use of a neural network to optimize and facilitate the development of a model for calculating optimal fuel compositions to ensure environmental sustainability and safety of the processing process.

The use of artificial neural networks to calculate the best concentrations and ratios of fuel mixture components is an innovative approach that has allowed us to achieve maximum accuracy in calculating the percentage mixtures of the fuel composition.

Research and improvement of methods and technologies for waste processing for renewable energy is not only relevant but also extremely important in terms of sustainable development and environmental protection.

We have developed more efficient methods and technologies for the thermal processing of household waste to produce energy.

The developed fuel compositions based on household waste are characterized by high thermal potential and minimal environmental impact, which makes them promising for use in energy generation. The proposals set forth in this thesis have received comprehensive scientific confirmation and can make a significant contribution to solving the problem of waste management in Ukraine.

An important scientific novelty is the approach to ensuring sustainable development and reducing the negative impact on the environment through the use of municipal solid waste as an energy source. This work contributes to the conservation of natural resources and the reduction of air emissions.

Ultimately, the thesis proposes a comprehensive approach to solving the problem of waste management in Ivano-Frankivsk region, including not only technological innovations but also socio-economic and legislative changes. The author emphasizes the importance of intersectoral cooperation between the state, business, and the public to achieve sustainable development and ensure environmental safety. The recommendations of the thesis point to the need to develop integrated strategies that would take into account the local characteristics of the Ivano-Frankivsk region and would help attract investment in the renewable energy and waste management sectors.

Key words: waste management, municipal waste, waste recycling, waste to energy, waste management strategy, environmental safety, ash.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації

1. Огляд сучасного стану сталих технологій для енергетичної утилізації твердих побутових відходів / **В. Чупа** та ін. Ecological safety and balanced use of resources. 2021. № 1(23). С. 115–123. URL: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-1\(23\)-115-123](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-1(23)-115-123) (**наукове фахове видання України**) (Особистий внесок – проведено збір та аналіз існуючих технологій у сфері термічної переробки побутових відходів).
2. **Чупа В. М.,** Адаменко Я. О., Чупа К. О. Дослідження термічного потенціалу різноманітних сумішей твердих побутових відходів до твердопаливних пелет. Ecological safety and balanced use of resources. 2023. № 2(26). С. 149–154. URL: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2\(26\)-149-154](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2(26)-149-154) (**наукове фахове видання України**) (Особистий внесок – на підставі власних лабораторних досліджень проведено порівняльний аналіз теплотворної здатності побутових відходів, твердопаливних пелет та їх композицій).
3. **Чупа В. М.,** Адаменко Я. О. Дослідження рівня зольності та вмісту хімічних елементів в золі різних видів твердих побутових відходів та твердопаливних пелет. Ecological Safety and Balanced Use of Resources. 2023. № 1(27). С. 92–98. URL: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2023-1\(27\)-92-98](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2023-1(27)-92-98) (Особистий внесок – на підставі власних лабораторних досліджень проведено аналіз показників зольності твердопаливних пелет та побутових відходів, а також досліджено рівні вмісту хімічних елементів, зокрема токсичних в їх золі).
4. **Chupa, V., & Zhovtulia, L.** (2023). Study of emissions into the atmosphere of pellets and solid waste. Environmental safety and balanced resource use, (2(28). URL: <https://ebzr.nung.edu.ua/index.php/ebzr/index> (**наукове фахове видання України**) (Особистий внесок – на підставі власних лабораторних

досліджень проведено аналіз викидів в атмосферне повітря під час спалювання побутових відходів та твердопаливних пелет).

5. Statistical analysis of the productivity of phytocoenoses of energy cultures due to implementation of wastewater sediment on aluvisols of Ukraine / **V. Chupa** et al. *Journal of ecological engineering*. 2023. Vol. 24, no. 9. P. 192–201. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/169161> (Q3) **(індексується в Scopus)** (Особистий внесок – проведено польові дослідження та підібрано оптимальні зразки енергетичних культур для подальших досліджень).
6. Comparative assessment of the content of heavy metals in the ash of solid fuel pellets and different types of sorted and unsorted solid domestic waste / **V. Chupa** et al. *Ecological engineering & environmental technology*. 2024. No. 25(5). URL: <http://www.ecoeet.com/Comparative-Assessment-of-the-Content-Of-Heavy-Metals-in-The-Ash-of-Solid-Fuel-Pellets,184236,0,2.html> (Q3) **(індексується в Scopus)** (Особистий внесок – на підставі власних лабораторних досліджень проведено порівняльний аналіз вмісту важких металів у золі твердопаливних пелет побутових відходів).

Тези наукових конференцій

7. **Chupa V. M.**, Hrytsuliak H., Fedorko N. B. Overview of the current state of sustainable technologies for energy utilization of solid waste. *Агрохімічні ресурси та управління біопродуктивністю агроландшафтів* : : Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції:, Київ, 23–25 листоп. 2021. Київ, 2021. P. 75–85.
8. Pollution of water resources / **V. M. Chupa** et al. *Modern science: innovations and prospects* : Proceedings of III International Scientific and Practical Conference, Stockholm, 5–7 December 2021. Stockholm, 2021. P. 197–204. (Провів дослідження, обробив отримані результати)
9. Прогнозування продуктивності *panicum virgatum* l (switchgrass) за допомогою комп'ютерної програми / **В. М. Чупа** та ін. *Science, innovations and education: problems and prospects* : Proceedings of V International

Scientific and Practical Conference, м. Токуо, 8–10 лют. 2021 р. Токуо, 2021. С. 22–34. (Зібрав інформацію, провів дослідження, сформулював висновки).

10. **Чупа В. М.**, Адаменко Я. О. Дослідження морфологічного складу ТПВ для відновлення енергії у Івано-Франківській області (збір та підготовка зразків ТПВ). *Актуальні питання сталого науковотехнічного та соціально-економічного розвитку регіонів України* : І всеукр. науково-практ. конф. здобувачів вищ. освіти, аспірантів та молодих вче., м. Запоріжжя, 19–21 жовт. 2021 р. Запоріжжя, 2021. С. 509–510. (Зібрав інформацію та обробив її, сформулював висновки)
11. **Чупа В. М.**, Чупа К. О., Адаменко Я. О. Оцінка рівня зольності твердих побутових відходів та твердопаливних пелет. *Адаптація до глобальних змін та викликів: нові форми економіки, ресурсоефективні технології, захист довкілля* : Всеукр. науково-практ. конф. здобувачів і молодих вчен., м. Івано-Франківськ, 18 трав. 2023 р. Івано-Франківськ, 2023. С. 349–350. (Провів дослідження, обробив отримані результати, сформулював висновки)
12. Study of the calorie value of solid domestic waste mixtures / **V. M. Chupa et al.** *The research process in science and the implementation of results* : Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference, Maribor, 24–25 April 2023. Maribor, 2023. P. 95–102. (Провів дослідження, обробив отримані результати, сформулював висновки)
13. **Чупа В.**, Грицик А. Рівні термічного потенціалу твердопаливних пелет та твердих побутових відходів. *Молодіжний екогеофорум – 2023* : Регіон. конф., м. Івано-Франківськ, 23–24 листоп. 2023 р. Івано-Франківськ, 2023. С. 84–85. (Провів дослідження, обробив отримані результати, сформулював висновки)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЯГНЕНЬ ТА МЕТОДІВ В СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ.....	22
1.1 Аналіз впливу побутових відходів на навколишнє середовище.....	22
1.2 Екологічне законодавство у сфері поводження з побутовими відходами в країнах ЄС та України.....	27
1.3 Аналіз досліджень у сфері використання відходів, як палива.....	31
1.4 Структура накопичення та поводження з побутовими відходами в Україні.....	38
1.5 Аналіз динаміки утворення та поводження з побутовими відходами в Івано-Франківській області.....	41
Висновки до розділу 1.....	43
РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА МЕТОДОЛОГІЙ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	46
2.1 Технології Waste-to-Energy (WtE).....	46
2.2 Характеристика зони досліджень.....	65
2.3 Характеристика енергетичних культур, як сировини для паливних гранул	70
2.4 Методологія виконання досліджень рівня калорійності побутових відходів та пелет	73
2.5 Моніторинг викиду шкідливих речовин у повітря під час спалювання побутових відходів та пелет	76
2.6 Методологія виконання досліджень рівня зольності та вмісту важких металів в побутових відходах та пелетах	78
2.7 Нейронні мережі та штучний інтелект як інструмент обробки та прогнозування даних.....	79
Висновки до розділу 2.....	84

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ЯК ТВЕРДОГО ПАЛИВА.....	86
3.1 Рівень зольності різних видів твердих побутових відходів та твердопаливних пелет.....	86
3.2 Хімічний склад золи сортованих та несортованих твердих побутових відходів.....	91
3.3 Хімічний склад золи твердопаливних пелет.....	95
3.4 Порівняння вмісту важких металів у золі твердопаливних пелет та різних видах сортованих та несортованих твердих побутових відходів	98
3.5 Дослідження рівня викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря під час спалювання різних видів твердих побутових відходів та твердопаливних пелет.....	103
Висновки до розділу 3.....	106
РОЗДІЛ 4 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОДУКУВАННЯ ПАЛИВА З КОПОЗИЦІЙ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ТА ТВЕРДОГО ПАЛИВА.....	109
4.1 Термічний потенціал різноманітних сумішей твердих побутових відходів до твердопаливних пелет.....	112
4.2 Статистична оцінка калорійності, зольності та потенційного хімічного забруднення при спалюванні сумішей твердих побутових відходів та твердопаливних пелет.....	113
4.3 Прогнозування оптимального співвідношення складу суміші твердих побутових відходів та твердопаливних пелет за допомогою штучних нейронних мереж.....	115
4.4 Підбір оптимальних співвідношень між різними видами палива....	122
4.5 Опис удосконаленої технології продукування твердого палива, методом підбору оптимальних паливних композицій.....	127
Висновки до розділу 4.....	129
ВИСНОВКИ.....	134
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	137
ДОДАТКИ.....	149

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

WtE – Waste-to-Energy (відходи в енергію)

КП – комунальне підприємство

ТГ – територіальна громада

ОТГ – обласна територіальна громада

ПГ – парникові гази

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Тема: «Удосконалення методів та технологій переробки відходів для отримання відновлювальної енергії (на прикладі Івано-Франківської області)» є надзвичайно актуальною не тільки в регіональному відношенні, але і в сучасному світі.

Проблема щодо зменшення обсягів утворення відходів та мінімізації негативних наслідків від діяльності з управління відходами, у тому числі і побутових відходів, залишається в Україні надзвичайно масштабною і гострою. У зв'язку з військовим станом в Україні в населених пунктах західних областей збільшилася кількість мешканців за рахунок внутрішньо переміщених осіб, що в свою чергу призвело до збільшення об'ємів утворення та накопичення побутових відходів на полігонах. Земельні ресурси, ґрунтовий покрив, водні ресурси, атмосферне повітря та соціальна сфера страждають від накопичення побутових відходів.

Законом України «Про управління відходами» передбачені такі дії, щодо їх управління: запобігання утворенню відходів; підготовки відходів до повторного використання; рециклінг; відновлення відходів (у тому числі виробництва енергії); видалення відходів. Частина відходів, які в даний час сортуються, досить мала оскільки сортуються тільки макулатура, пластикові пляшки, склобій та металобрухт.

Також проблема з управлінням відходів дуже гостро стоїть у приватних господарствах та малих населених пунктах – сортування побутових відходів практично відсутнє, відстань від віддалених населених пунктів до місць сортування та накопичення відходів подекуди вимірюється сотнями кілометрів, що призводить до утворення стихійних сміттєзвалищ та відкритого спалювання відходів, що може вважатись локальною екологічною катастрофою.

Тому, дисертаційні дослідження направлені на вирішення актуального науково-практичного завдання, щодо управління відходами та отримання із

них відновлювальної енергії шляхом удосконалення методів та технологій використання побутових відходів для отримання термічної енергії.

Також, сучасні ІТ-технології дозволили запропонувати вирішити актуальні завдання сучасності за допомогою автоматизованого обчислювального комплексу, який розроблений на базі нейронних мереж та штучного інтелекту. Цей комплекс дозволяє оптимізувати композиції з побутових відходів у поєднанні з екологічно чистими зразками твердих палив, таких як енергетичні культури, зокрема топінамбур та різних видів деревини та твердопаливних пелет.

Розробка таких паливних композицій мінімізує негативний вплив побутових відходів на компоненти довкілля за допомогою оптимального підбору їх концентрацій в паливних сумішах. Такі паливні композиції характеризуються високим рівнем термічного потенціалу за рахунок висококалорійних видів побутових відходів (пластик, гума і т.і.) та мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Запропоновані в дисертаційній роботі способи отримання енергії із побутових відходів знайшли усебічне наукове обґрунтування.

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

Дисертаційну роботу виконано відповідно до науково-дослідних робіт, які проводяться на кафедрі екології, енергетичного менеджменту та технічної діагностики Івано-Франківського національного університету нафти і газу:

«Відновлення енергії з використанням теплового перетворення в транскордонному регіоні ЕнуMSW» (№HUSKROUA/1702/6.1/0015);

«Транскордонна мережа енергетично сталих університетів Cross-border Network of Energy Sustainable Universities (Net4Energy)» (№HUSKROUA1702/6.1/0075);

«Регіональний центр навчання та моніторингу впливу електроустановок на навколишнє середовище – CRIMIGE» (№HUSKROUA/1702/6.1/0022);
«Innovation Laboratories for Climate Actions – ILCA» (№ 220194)

Мета і завдання дослідження.

Мета досліджень – вирішення актуального науково прикладного завдання в галузі удосконалення методів та технологій термічної переробки побутових відходів для одержання відновлювальної енергії.

Для досягнення поставленої мети вирішували такі **завдання**:

- проаналізувати існуючі методи поводження з побутовими відходами, а особливо технології термічної переробки; і тенденції розвитку
- дослідити структуру та масштаби накопичення відходів на території КП «Полігон ТПВ» їх морфологічний склад; дослідити та проаналізувати хімічні та фізичні параметри компонентів побутових відходів, що придатне для спалювання;
- розробити способи розрахунку оптимальних паливних композицій з урахуванням екологічного впливу та термічного потенціалу побутових відходів, як твердого палива;
- удосконалити технологію низькотемпературного спалювання для спрощення процесу переробки.

Об'єкт дослідження – термічна переробка відходів у сумішах з пелетами для визначення оптимальних їх композицій.

Предмет дослідження – методи та технології термічної переробки побутових відходів, для отримання відновлювальної енергії

Методи дослідження. При проведенні досліджень використовувались загальнонаукові методи (аналізу, узагальнення, абстрагування, синтезу), методи математичної статистики, кореляційного і регресійного аналізу, з використанням програм Microsoft Excel, Statistika, та artificial neural network (ANN) – нейронні мережі.

Базою даних для теоретичних і аналітичних досліджень були матеріали по районах Івано-Франківської області за 2005-2022 роки, наведені у щорічниках «Регіональні доповіді про стан навколишнього природного середовища», «Екологічному паспорті», Івано-Франківської області, інформація Головного управління статистики Івано-Франківської області,

щорічні звіти КП «Полігон ТПВ» та власні дані, отримані у польових, експедиційних дослідженнях.

Наукова новизна одержаних результатів:

У дисертації сформульовано й вирішено важливу науково-прикладну проблему запобігання накопиченню відходів на полігонах, за допомогою екологічно безпечних технологічних рішень:

- Вперше за допомогою алгоритмів штучного інтелекту розроблено метод визначення оптимальних концентрацій та співвідношень компонентів паливних сумішей (побутові відходи, паливні пелети та інше) для їх подальшої термічної переробки, що дозволило досягти їх максимальну енергоефективність та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.
- Вперше встановлено залежності оптимального співвідношення суміші твердопаливних деревних пелет та суміші відходів полігону КП «Полігон ТПВ» (с. Рибне), яке знаходиться у межах, що були визначені за допомогою спеціально навченої штучної нейронної мережі та розраховані за допомогою автоматичної розрахункової моделі і забезпечує досягнення найбільш оптимальних показників калорійності при дотриманні вимог екологічної безпеки.
- Подальшого розвитку та вдосконалення набув метод визначення енергетичного потенціалу компонентів паливних сумішей з побутових відходів різних типів (пластик, гума, текстиль, біовідходи, дерево, папір та несортований горючий матеріал), твердопаливних деревних пелет та енергетичних біокомпонентів (топінамбур та інші), що дає можливість оперативно, в залежності від їх фізико-хімічних характеристик формувати максимальну калорійність підчас низькотемпературного спалювання, що забезпечує зменшення концентрації забруднюючих речовин у викидах в атмосферне повітря, а також призводить до мінімізації зольності у продуктах згорання.

– Подальшого розвитку та вдосконалення набула технологія низькотемпературної термічної переробки паливних композицій, яка може використовуватися як на полігонах відходів, так і у приватних домогосподарствах.

Основні результати наукових досліджень використано у навчально-виховному процесі під час викладання дисципліни «Енергетика майбутнього», «Інженерія відновлювальної енергетики» для студентів II – III курсів ІФНТУНГ та «Нормування антропогенного навантаження на навколишнє середовище», «Методи вимірювання параметрів НС» для студентів II – III курсів спеціальності 101 «Екологія» Івано-Франківського коледжу ЛНУП, які здобувач самостійно розробив та викладав під час навчання в аспірантурі. Розроблено навчальну дисципліну, яка базується на представленій науково-дослідній роботі: «Енергетичний потенціал ТПВ».

Особистий внесок здобувача третього рівня вищої освіти

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням автора, який брав безпосередню участь в обґрунтуванні наукової проблеми, розробленні схеми досліджу, визначенні мети, задач і підборі методик досліджень, аналізі та статистичній обробці отриманих експериментальних даних, формулюванні наукових висновків, а також у демонстрації та впровадженні результатів досліджень у виробництво. Зі спільних наукових праць у дисертаційній роботі автором використано результати власних досліджень та лабораторних аналізів.

Апробація результатів в дисертації

I-ий Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України» Запорізький національний університет (19-21 жовтня 2021 року) м. Запоріжжя;

The 3-rd International Scientific and Practical Conference «Modern science: innovations and prospects» (December 5-7, 2021), Stockholm, Sweden;

The 5-th International Scientific and Practical Conference “Science, innovations and education: problems and prospects” (December 8-10, 2021), Tokyo, Japan;

Міжнародній науково-практичній конференції: Агрохімічні ресурси та управління біопродуктивністю агроландшафтів. Національний університет біоресурсів і природокористування України агробіологічний факультет Кафедра агрохімії та якості продукції рослинництва ім. О. І. Душечкіна НУБіП (23-25 листопада 2021) м. Київ;

Регіональній конференції «Молодіжний екогеофорум-2023». Івано-Франківський національний університет нафти і газу (23-24 листопада 2023) м. Івано-Франківськ, 2023.

Публікації. Основні результати і висновки дисертаційного дослідження опубліковано у 13 працях, у тому числі – 2 у закордонних виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus, 4 статей у фахових наукових виданнях України, 7 – у матеріалах і тезах наукових форумів, конференцій.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, науково-практичних рекомендацій, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 167 сторінок друкованого тексту, обсяг основного тексту становить 112 сторінок. Тестову частину ілюстровано 53 рисунками і 21 таблицями. Список літератури складає 113 назв, із них 76 латиницею.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЯГНЕНЬ ТА МЕТОДІВ В СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ

1.1 Аналіз впливу побутових відходів на навколишнє середовище

У сучасному світі інтенсивна економічна діяльність людини призводить до утворення великої кількості відходів. Проблема управління побутовими відходами продовжує домінувати як головна для суспільства та уряду, особливо в міських районах, переповнених високим рівнем населення зростання та утворення відходів [45, 72, 87 – 89]. Способи захоронення цих відходів, такі як їх складування на полігонах та переробка, часто негативно впливають на стан навколишнього середовища. У даній роботі розглядається проблема впливу побутових відходів на довкілля, аналізується їх утворення та прогнозується можливе зростання обсягів цих відходів. Проблема управління відходами є актуальною у всьому світі. Хоча побутові відходи становлять лише невелику частку від загальної кількості відходів, їх вплив є значним через екологічні, економічні та соціальні складнощі, пов'язані з їх управлінням [1, 12 – 14].

Також сприяє циркулярній міській економіці, яка сприяє скороченню споживання кінцевого ресурси, повторне використання та переробка матеріалів для усунення відходів, зменшення забруднення, вартість збереження та зелене виробництво [17, 67 – 69]. Однак у поєднанні з економічним зростанням, покращенням способу життя та споживанням міста по всьому світу продовжуватимуть стикатися з надзвичайною проблемою побутових відходів у світі. Очікується, що чисельність населення зросте до 8 мільярдів до 2025 року і до 9,3 мільярда до 2050 року, з яких близько 70% житимуть у містах [17, 62]. У країнах, що розвиваються, збирають більшість міст лише 50–80% утворених відходів, витративши 20–50% своїх бюджетів, з яких 80–95% витрачається на збирання та транспортування відходів [31, 44]. Причому багато малозабезпечених країн збирають лише 10% відходів, яке

утворюється в приміських районах, що створює ризики для здоров'я населення та навколишнього середовища, включаючи більшу кількість випадків діареї, гострих респіраторних інфекцій серед людей, особливо дітей, які проживають поблизу полігонів відходів [55]. Перешкоди для ефективного муніципального управління побутовими відходами включають брак обізнаності, технологій, фінанси та ефективне врядування [6–8].

Термін "відходи" є ключовим у національних і міжнародних нормативних актах, що регламентують ринок відходів. З економічної точки зору, відходи розглядаються як негативний бічний продукт, який виникає в результаті споживчих і виробничих процесів, і який негативно впливає на умови життя та забруднює навколишнє природне середовище. Відходи – будь-які речовини, матеріали або об'єкти, що виникають під час виробництва або споживання, а також продукти, які повністю або частково втратили свої споживчі властивості і більше не використовуються у місці їх утворення чи виявлення. Власник таких відходів має намір або зобов'язаний позбутися їх шляхом переробки або видалення [2, 67, 78].

Побутові відходи - 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 батарейок 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 [3, 47, 64].

На наш погляд, побутові відходи можна розглядати як частину твердих комунальних відходів, що включають цінні компоненти, які можуть бути повторно використані в господарстві, а також небезпечні відходи, що генеруються домогосподарствами. Такий підхід спрямований на збільшення обсягу та якості збору вторинної сировини для повторного використання в господарстві, забезпечення безпеки технологічних процесів та мінімізацію негативного впливу на довкілля [4, 37, 46].

Запобігання утворенню відходів означає вжиття заходів до того, як речовина чи продукт перетворюється на відхід. Ці дії спрямовані на скорочення обсягу відходів, включно з повторним використанням продуктів або подовженням їхнього життєвого циклу. Вони також мають на меті зменшення негативного впливу відходів на довкілля і здоров'я людини, а також зниження рівня шкідливих речовин у матеріалах та продуктах [5, 47, 56]. До кінця XX століття у світовій практиці з'явився новий напрямок, названий "Waste Management" (управління відходами). Концепція управління відходами охоплює всі дії та заходи, які стосуються відходів, починаючи від їх утворення і закінчуючи остаточною переробкою. Це включає збір, транспортування, переробку, відходів, а також моніторинг та нормативно-правове регулювання. Все це має на меті мінімізувати негативний вплив відходів на здоров'я людей та на довкілля [6, 56, 83].

У сучасних умовах ефективному управлінню відходами приділяється значна увага. Це пов'язано зі зростанням обсягів відходів, збільшенням витрат на їх збір, зберігання, переробку, захоронення та транспортування. Ростучі обсяги відходів погіршують екологічну ситуацію в країнах, що безпосередньо впливає на політику та економіку. Тому важливо проводити ефективну політику управління відходами, відповідно до загальноприйнятих принципів.

У більшості країн, що розвиваються, відходи, зібрані з домогосподарств, захоронюється на полігонах, більшість з яких, за прогнозами, досягне їх потужності протягом десяти років [11, 76, 93]. Неєкологічний підхід до скидання або спалювання відходів на відкритому просторі, як правило, поблизу бідних громад на околиці міста, або викидання відходів у водойми було прийнятною стратегією переробки відходів. Подібним чином у кількох містах досі використовуються об'єкти старого покоління або погано керовані об'єкти та неофіційне неконтрольоване звалище або спалювання відходів просто неба. Часто ці практики стосуються маргінальних соціальних груп поблизу місць захоронення [10, 45, 70, 83]. Крім того, цей підхід створює кілька проблем сталого розвитку, включаючи виснаження ресурсів,

забруднення навколишнього середовища та проблеми громадського здоров'я, наприклад поширення інфекційних захворювань. Однак з моменту появи екологічного руху в 1960-х роках, була проведена глибока оцінка ризиків для навколишнього середовища та здоров'я населення, пов'язаних із нестійкими методами поводження з побутовими відходами.

На даний момент в Україні поводження з відходами є екологічним викликом, тим більше, що обсяг побутових відходів продовжує зростати. Основним способом переробки відходів є захоронення [7]. Спалювання побутових відходів може мінімізувати їх масу на 70% і об'єм на 90% (Luo et al., 2019), а також рекуперацію електроенергії та тепла (Allegrini et al., 2015). Порівняно з найпопулярнішими методами обробки відходів (такими як санітарні звалища та компостування), спалювання за допомогою систем управління викидами в повітря вважається більш безпечним варіантом (Li et al., 2019). Інтеграція спалювання та інших методів поводження з відходами, таких як періодична та напівпорційна звичайна дистиляція, біологічна очистка стічних вод, дистиляція на основі захоплювача, фізична адсорбція та екстракція для обробки небезпечних відходів, утворених хімічною промисловістю, може допомогти досягти сталого розвитку в африканських країнах (Omwoma et al., 2017).

Завдяки своїм екологічно чистим властивостям, таким як уникнення викидів метану та зменшення забруднення води та ґрунту, технологія спалювання привернула світову увагу (Gu et al., 2019). У 2015 році світовий обсяг спалених відходів перевищив 255 000 000 тонн (Reddy, 2016). У тому ж році Китай спалив близько 32,7% (80 000 000 тонн) побутових відходів у 220 установках спалювання відходів (Статистичний щорічник Китаю, 2016). В інших країнах, таких як Данія та Японія, понад 65% побутових відходів спалюється (Damgaard et al., 2010). Щоб інертувати небезпечні та медичні відходи, більшість країн Африки та Латинської Америки спалюють їх без відновлення енергії. (Scarlat et al., 2015). Останнім часом у світі існує близько 1179 муніципальних заводів зі спалювання побутових відходів із загальною

потужністю 700 000 метричних тонн на день (Lu et al., 2017). Окрім внеску в охорону навколишнього середовища, спалювання побутових відходів може також утворювати багато димових газів. Якщо з ними поводитися неправильно, вони можуть завдати шкоди навколишньому середовищу. Забруднюючі речовини в димових газах складаються з пилу та газів, таких як діоксид сірки (SO_2), хлористий водень (HCl), фтористий водень (HF), діоксид азоту (NO_2) і діоксини. Ці забруднювачі можна видалити за допомогою передових хімічних процесів, що може значно збільшити вартість проекту (Mutz та ін., 2017).

Дослідники з усього світу звернули увагу на екологічні наслідки спалювання побутових відходів для виробництва електроенергії. Викиди парникових газів від спалювання відходів для виробництва енергії в Пекіні були досліджені Яо та ін. (2019). Автори дійшли висновку, що здатність пом'якшувати забруднення ПГ від міських відходів для виробництва електроенергії зростає разом із постійними змінами в політиці та технологіях. Beylot і Villeneuve (2013) досліджували вплив на навколишнє середовище спалювання залишкових побутових відходів у Франції, використовуючи підхід життєвого циклу. Автори виявили, що потенційні наслідки спалювання однієї тонни побутових відходів на зміну клімату становлять вигоду від -58 кг CO_2 екв до 408 кг CO_2 екв навантаження із середнім впливом 294 кг CO_2 екв. Порівняно вплив на навколишнє середовище використання технологій спалювання та газифікації для обробки побутових відходів у Німеччині (Mauger et al., 2020). Автори вважають, що з точки зору впливу на навколишнє середовище спалювання відходів не є кращим порівняно з анаеробним зброджуванням і компостуванням. Гуо та ін. (2018) оцінили екологічний вплив спалювання міських відходів у традиційному китайському бізнес-парку. Дослідники дійшли висновку, що існуючі резерви для спалювання побутових відходів мають сприятливі екологічні переваги щодо впливу на клімат, забруднення людиною та підкислення, але мають шкідливий вплив на потенціал евтрофікації. Було досліджено особливості викидів вихідних

галогенованих ПАУ при моделюванні спалювання відходів (Li et al., 2019). Автори вважають, що спалювання відходів є ефективним і менш забруднювальним методом перетворення відходів в енергію. Однак вони попередили, що побічні канцерогени не є нешкідливими. Ашкан та ін. (2017) провели екологічну оцінку життєвого циклу для спалювання побутових відходів в Ірані. Встановлено, що за рахунок виробництва електроенергії та фосфорних добрив спалювання зменшує шкідливі фактори, пов'язані з токсичністю. Автори також встановили, що оцінені викиди ПГ від спалювання побутових відходів становлять 4499,07 кг CO₂ екв. Як видно з наведеної вище міжнародної літератури, більшість авторів зосереджувалися лише на викидах ПГ від спалювання відходів. Крім того, деякі автори зосереджувалися на потенціалі виснаження викопних покладів, потенціалі підкислення, потенціалі евтрофікації та токсичності, але не враховували потенціал викидів діоксину завдяки технології спалювання відходів.

Хоча в Африці немає комерційних заводів зі спалювання відходів, деякі місцеві дослідники вивчали потенціал виробництва електроенергії з побутових відходів у громадах за допомогою технології спалювання. Перспективи виробництва електроенергії з побутових відходів в африканських країнах за допомогою технології спалювання були досліджені Scarlat et al. (2015). Однак автори не врахували екологічну оцінку, яка дозволить приймати рішення щодо екологічної стійкості проєктів спалювання в Африці. Айоделе та ін. (2017) провели екологічну оцінку життєвого циклу спалювання побутових відходів у Нігерії. У цьому дослідженні було проведено оцінку потенціалу глобального потепління, підкислення та викидів діоксинів для інтегрованих технологій перетворення звалищного газу в енергію та спалювання (LFGTE/INC) і технологій анаеробного зброджування та спалювання (AD/INC). Це ускладнює визначення впливу на навколишнє середовище лише технології спалювання. В іншому дослідженні в Нігерії Ogunjuigbe et al. (2017) дослідили економічну доцільність та електричний

потенціал спалювання побутових відходів. Автори не враховували екологічні наслідки проєкту спалювання [1-51].

1.2 Екологічне законодавство у сфері поводження з побутовими відходами в країнах ЄС та Україні.

Законодавство Європейського Союзу (ЄС) щодо поводження з побутовими відходами є всеохоплюючим і спрямоване на сприяння сталим методам поводження з відходами. Ключові директиви та правила включають: [52-55].

- **Рамкова директива щодо відходів (WFD):** це центральна правова база для обробки та управління відходами в ЄС, встановлена Директивою (ЄС) 2018/851. Він встановлює основні поняття та визначення, пов'язані з управлінням відходами, включаючи відходи, переробку та відновлення. Директива наголошує на «ієрархії відходів» і встановлює цілі щодо переробки та повторного використання побутових відходів із збільшенням відсотків, які мають бути досягнуті до 2025, 2030 та 2035 років. Вона також запроваджує обов'язковий роздільний збір певних типів відходів до 2025 року, включаючи текстиль та небезпечні відходи. відходи.

- **Спеціальна політика поводження з відходами:** ЄС має спеціальні правила щодо різних типів відходів, таких як батареї та акумулятори, відходи, що піддаються біологічному розкладанню, будівельні відходи та відходи знесення, зношені транспортні засоби, відходи звалищ, відходи шахт, відходи упаковки, відходи, що містять стійкі органічні речовини. забруднюючі речовини (POPs) та відходи електричного та електронного обладнання (WEEE). Кожна з цих категорій має власний набір правил і директив ЄС для забезпечення належного управління та переробки.

- **Розширена відповідальність виробника:** цей принцип має вирішальне значення для муніципалітетів для фінансування збору певних потоків відходів. Він зобов'язує виробників нести відповідальність за збір,

переробку своєї продукції після закінчення її життєвого циклу. Цей принцип включено в різні директиви, наприклад Директиву WEEE.

- Положення про перевезення відходів: це положення контролює перевезення відходів, спрямоване на покращення захисту навколишнього середовища та встановлення системи контролю за переміщенням відходів, включаючи міжнародні перевезення.

- Директива з екодизайну: вона встановлює загальноєвропейські правила для покращення екологічних характеристик продуктів, наприклад побутових приладів, і містить вимоги щодо енергоефективності та можливості переробки.

- Цілі щодо переробки та захоронення відходів: ЄС встановив амбітні цілі щодо переробки відходів та скорочення використання звалищ. До 2030 року ЄС прагне досягти 60% повторного використання та переробки побутових відходів. У ЄС відбувся помітний зсув у бік більшої переробки та меншого захоронення відходів, а в деяких країнах захоронення відходів майже не існує.

- Циркулярна економіка та запобігання утворенню відходів: підхід ЄС до управління відходами все більше зосереджується на моделі циклічної економіки, надаючи пріоритет запобігання утворенню відходів, повторному використанню продуктів і переробці ресурсів для створення більш стійкої системи управління відходами.

Система управління відходами в Україні регулюється наступними основними законами та підзаконними актами: [56].

- Закон України «Про управління відходами» (від 13.12.2022), встановлює основу для комплексного та відповідального підходу до поводження з відходами, зорієнтованого на мінімізацію їх впливу на довкілля. Він передбачає розробку регіональних планів управління відходами, впровадження принципу розширеної відповідальності виробників, зобов'язання щодо безпечного зберігання та переробки відходів, а також ведення відповідної документації. Закон спрямований на зменшення обсягів

захоронення відходів та підвищення рівня їх переробки, відповідаючи європейським стандартам та прагненням України до екологічної безпеки та сталого розвитку.

- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» (від 25.06.1991 з подальшими змінами), є ключовим документом, який 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. Закон також підкреслює важливість екологічного виховання та освіти громадян, організації територій природно-заповідного фонду, і надання громадянам права на екологічну інформацію. 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.

- Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» (від 24.02.1994 з подальшими змінами), регулює суспільні відносини у цій сфері, встановлюючи права та обов'язки для державних структур, підприємств та громадян. Закон передбачає створення та функціонування державної санітарно-епідеміологічної служби і державного нагляду за дотриманням санітарних норм та стандартів у країні.

- Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» (від 23.05.2017).

Закон України "Про оцінку впливу на довкілля", прийнятий 23.05.2017, 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.

- Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку» (від 20.03.2018), 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, зокрема визначення "громадськості", "держави походження", "документів державного планування", "замовника" та "зачепленої держави". Ці положення сприяють залученню громадськості та забезпечують транспарентність процесу оцінки, а також врахування можливих транскордонних наслідків планованих заходів для довкілля.

- Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017р. № 820), має на меті приведення української системи управління відходами у відповідність до європейських стандартів. Це включає впровадження ефективних механізмів у цій сфері, зменшення обсягу відходів, сприяння їх переробці та повторному використанню. Стратегія передбачає ряд законодавчих та нормативних ініціатив, спрямованих на покращення управління відходами, а також на розробку та затвердження відповідних планів дій.

- Національний план управління відходами до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20 лютого 2019 р. № 117-р.).

На цей час, на основі позицій, наведених у Національній стратегії управління відходами до 2030 року, та Національного плану управління відходами до 2030 року, розробляється Регіональний план управління відходами в Івано-Франківській області до 2030 року з урахуванням європейських підходів з питань управління відходами, що базуються на положеннях:

- Рамкової Директиви № 2008/98/ЄС Європейського парламенту та Ради від 19 листопада 2008 р. «Про відходи та скасування деяких директив», вона спрямована на заохочення заходів, що зменшують вплив відходів на довкілля та здоров'я людей, та підтримують перехід до більш сталої економіки за принципом "від колиски до колиски". Директива включає принципи управління відходами, такі як ієрархія відходів, яка віддає перевагу запобіганню відходам, повторному використанню, переробці, іншим способам відновлення.

- Директиви Ради № 1999/31/ЄС від 26 квітня 1999 р. «Про захоронення відходів», ставить за мету запобігання або зменшення негативного впливу захоронення відходів на довкілля, зокрема на поверхневі та підземні води, ґрунт, повітря, та на здоров'я людини. Директива встановлює вимоги до захоронення відходів, включаючи технічні вимоги до звалищ, заходи контролю та управління звалищами, а також процедури закриття звалищ та подальшого спостереження за ними.

- Директиви № 2006/21/ЄС Європейського парламенту та Ради від 15 березня 2006 р. «Про управління відходами видобувних підприємств, та якою вносяться зміни до Директиви 2004/35/ЄС», встановлює рамки для управління відходами, що генеруються видобувними підприємствами, з метою зменшення їхнього впливу на довкілля та здоров'я людей. Вона вимагає від підприємств вживати заходів для запобігання утворенню відходів, їхнього зменшення, оброблення та моніторингу. Директива також вносить зміни до Директиви 2004/35/ЄС, що стосується відповідальності за екологічні збитки.

- Директиви 94/62/ЄС Європейського парламенту та Ради від 20 грудня 1994 р. «Про упаковку та відходи упаковки», 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.

- Директиви 2012/19/ЄС Європейського парламенту та Ради від 4 липня 2012 р. «Про відходи електричного та електронного обладнання

(ВЕЕО)», спрямовані на захист довкілля та здоров'я людей шляхом запобігання утворенню відходів ВЕЕО та зниженню загального обсягу таких відходів через їх переробку та повторне використання.

- Директиви 2006/66/ЄС Європейського парламенту та Ради від 6 вересня 2006 р. «Про батарейки і акумулятори та відпрацьовані батарейки і акумулятори», з метою зменшення їх негативного впливу на довкілля.

1.3 Аналіз досліджень у сфері використання відходів, як палива

Використання відходів, як джерела відновлювальної енергії широко відображене, як й іноземних та і у відчизняних дослідженнях. Іноземні вчені акцентують свою увагу в основному на високотемпературних процесас переробки відходів.

Дослідження, проведене авторами (Kaar, A., та ін.), розглядає комплексні методи переробки побутових відходів на енергію через використання технологій Waste to Energy (WtE) та Energy from Waste (EfW). Вони аналізують екологічні та економічні аспекти різних методів, включаючи термічні процеси, такі як спалювання, піроліз, газифікація, а також біологічні методи, наприклад біометанізацію. Автори оцінюють переваги та недоліки кожного методу, враховуючи їхній потенціал у зниженні викидів парникових газів, зменшенні залежності від викопного палива, раціональному використанні звалищних ресурсів та сприянні сталому управлінні відходами. Цілі дослідження охоплюють не тільки технічний аналіз, але й розробку ефективних, екологічно чистих рішень для перетворення побутових відходів у відновлювану енергію [57].

Дослідження авторів (Abis, M., та ін.), зосереджено на оцінці синергії між рециклінгом та термічною обробкою при управлінні побутовими відходами в Європі. Воно досліджує сучасний стан управління побутовими відходами, аналізуючи стратегії країн ЄС та визначаючи потенційні покращення. Використовуючи триетапну методологію: аналіз тенденцій

управління побутовими відходами, оцінку потенціалу спалювання та характеристики золи-відходів, а також визначення майбутніх перспектив в рамках рамок рециклінгу та термічної переробки. Автори пропонують альтернативну стратегію управління побутовими відходами, спрямовану на підвищення рівня переробки та оптимізацію термічного потенціалу, що сприяє досягненню цілей циркулярної економіки [58].

Дослідники (Wong, G., та ін.) розробили новий метод низькотемпературної обробки плавленням для спільної переробки золи-виносу та кубового шлаку, що утворюються внаслідок спалювання побутових відходів. Метод знижує температуру плавлення, забезпечуючи оптимальний склад CaO , SiO_2 , та Al_2O_3 , що дозволяє ефективно переробляти відходи при значно нижчому споживанні енергії. Результатом дослідження стало отримання склокераміки, що відповідає стандартам токсичності вилюговування, знижуючи екологічні ризики і сприяючи сталому управлінню відходами [59].

Автори (Nandhini, R., та ін.) в своїх дослідженнях представили огляд термохімічних методів перетворення муніципальних відходів на енергію та водень. В огляді охоплюються технології, такі як торефакція, піроліз, газифікація та спалювання, детально описуючи, як кожен процес сприяє виробництву енергії, оптимальні умови для цих процесів та їхній вплив на навколишнє середовище. Акцентується роль каталізаторів у підвищенні виробництва водню та обговорюються техніко-економічні аспекти та оцінки життєвого циклу цих обробок. Дослідники надали уявлення про ефективні стратегії управління відходами, які відповідають цілям циркулярної економіки, висвітлюючи потенціал інтеграції кількох термохімічних обробок для покращення виробництва енергії та екологічних переваг [60].

Дослідники (Unegg, M. C., та ін.) прогвели всебічний аналіз викидів CO_2 від управління відходами, порівнюючи екологічні наслідки рециклінгу та спалювання з первинним виробництвом матеріалів. Вчені зосередилися на кількісному визначенні чистого надлишку або зменшення CO_2 від термічного

та матеріального рециклінгу в Австрії, використовуючи методології оцінки життєвого циклу. Їх висновки підкреслили ефективність використання відходів як альтернативного джерела енергії, особливо на цементних заводах та в паперовій промисловості, для зниження викидів CO_2 . Дослідження мало на меті надати уявлення про ефективні практики управління відходами, які відповідають кліматичним цілям, пропонуючи потенційні значні економії національних викидів CO_2 через оптимізовані стратегії обробки відходів [61].

Дослідженням в сфері оцінки екологічних наслідків виробництва пластикових гранул із перероблених поліолефінових пластмас займалися (Saleem, J., та ін.). Застосовуючи методології оцінки життєвого циклу (LCA) та програмне забезпечення Gabi, де вчені порівняли два сценарії з різними рівнями відновлення ксилолу. Висновки показали, що вище відновлення ксилолу призводить до зниження вуглецевих викидів та загального екологічного впливу, демонструючи переваги рециклінгу порівняно з використанням первинних матеріалів. В дослідженні також вивчалось вплив використання відновлюваних джерел енергії, де було виявлено значне зниження екологічних наслідків, акцентуючи на сталих практиках управління відходами в рамках концепції циркулярної економіки [62].

Автори (Yue, C., та ін.) займалися аналізом впливу атмосфери N_2/CO_2 на процес піролізу гранул з побутових відходів. Досліджується, як різні пропорції N_2 до CO_2 у реакторі з нерухомим шаром впливають на характеристики виділення газу, склад смоли та структуру вугілля, що утворюється. Результати показали, що додавання CO_2 підвищує вихід вугілля та газу, знижуючи при цьому вихід смоли. Вивчення також зосереджено на впливі CO_2 на зменшення вмісту легкого вуглеводню та H_2 , а також на структурні зміни вуглецю, що сприяє кращій переробці [63].

Дослідники (Tran, H., та ін.) розглядали екологічний вплив виробництва деревних гранул та використання біоенергії у Сполучених Штатах, зосереджуючись на викидах, пов'язаних з цими процесами. Воно має на меті оцінити вуглецевий слід та сталість використання біомаси для енергії,

надаючи уявлення про ефективність та екологічні наслідки виробництва деревних гранул та споживання біоенергії. Це дослідження вносить вклад у тривалу дискусію про джерела відновлюваної енергії та їхню роль у досягненні цілей вуглецевої нейтральності та екологічної сталості [64].

Дослідження, щодо рівнів термічного потенціалу побутових відходів описано в багатьох іноземних та відчизняних працях. На відміну від закордонних вчених, наші відчизняні вчені більше зосереджуються на простіших методах поводження з відходами, але з дотриманням загальноприйнятих підходів до аналізу їх фізико-хімічних властивостей та видів забруднень, що виділяються у процесі термічної переробки.

Зокрема визначенням теплоти згоряння компонентів побутових відходів за різними методиками добре висвітлені в дисертаційній роботі Воробйова Л. Й., де було проаналізовано різні методи дослідження калорійності за різного рівня вологості [65].

Дослідженнями в галузі технології та обладнання для виробництва альтернативних видів палива займалася низка провідних українських вчених Інституту технічної теплофізики НАН України. Зокрема (Петрова Ж. О., Гелетуха Г. Г., та ін.), в своїх масштабних дослідженнях вони зосередили свою увагу на розробленні методики оцінювання енергетичного потенціалу біомаси та розробку комплексу технологій: переробка торфу на композиційне паливо та гумінові добрива, ефективного спалювання низькоякісних видів біопалива та спалювання твердого біопалива вологістю до 55% на рухомих колосникових решітках, також було авторами було визначено оптимальні режими роботи газозбірних свердловин систем збору біогазу на звалищах і полігонах [66].

Варто зазначити, що під час Національного форуму «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології», що проходив 8-10 жовтня в м. Івано-Франківськ, частина доповідей стосувалась використання побутових відходів, як палива. Зокрема автори (Залаєвський О. Є., Коляда А. С.,) дискусували на тему використання сортованих відходів, а особливо

деревних, що можуть бути перетворені на тверде паливо для котлів. Автор (Лицур І. М.) зазначив, що використання деревних відходів, як палива є одним із основних механізмів до безвідходного виробництва у лісовому секторі Карпатського регіону. Інший напрямок використання відходів, як палива в своїй доповіді окреслила (Веремейчик Н. В.), її напрямок дослідження базувався на вирішенні подвійної проблеми, теплозабезпечення віддалених сіл за допомогою відходів рослинності. Дане рішення є вдалим, але рівень калорійності рослинних відходів – низький, тому за допомогою медоів окреслених в нашому дослідженні можна з використанням побутових відходів підвищити теплотворну здатність такої паливної композиції. Автор (Гахович Н. Г.) наголошує на важливості використання побутових відходів, як RDF-палива, що додатково підкреслює важливість наших досліджень [67].

Сферу управління відходами досліджували автори (Веденіна Ю. Ю. та ін.), наголошують на недостатньо розкриту тему використання відходів у якості вторинної сировини в Україні та важливість впровадження інноваційних технологій щодо зменшення негативного впливу нанавколишнє середовище [68].

Важливо наголосити, що існують проекти та стартапи по розробці станцій переробки відходів. Згідно інформації дана установка не характеризується великою продуктивністю, але є досить мобільною. Варто зазначити, що на даний час існує тільки одна така установка, яка виготовляє паливні брикети виключно з торфу.

Дана установка є хорошим рішенням для стихійних або віддалених сміттєзвалищ, але проблемою залишається низька калорійність отриманих таким способом брикетів. Технологія та методи, що запропоновані в нашій роботі характеризуються більш удосконаленим підходом до утворення паливних пелет і калорійність паливних композицій з побутовими відходами знаходиться на рівні з іншими традиційними видами палива, а в деяких випадках є вищою [69].

Дослідженням характеристик побутових відходів як енергетичного ресурсу займалися (Воронич, А., та ін.). Авторами було проаналізовано енергетичний потенціал побутових відходів Івано-Франківської області в контексті використання їх як палива для сміттє спалювальних заводів, цементних заводів, тощо [70].

Наші дослідження доповнюють проведений вище аналіз, але спрямовані в концепцію низькотемпературного спалювання та отримання відносно екологічно чистого палива з побутових відходів в паливних композиціях з твердопаливними пелетами. На нашу думку, не вирішеними або більшого поглиблення досліджень потребують такі напрямки:

- Підтвердження об'єктивності методів нашого дослідження через отримання схожих результатів теплотворної здатності побутових відходів.
- Розширення фокусу на використання різноманітних компонентів побутових відходів у виробництві паливних гранул для оптимізації теплотворної здатності та екологічності.
- Розвиток методів переробки не тільки деревних, але й більш небезпечних відходів (пластик, текстиль) для підвищення теплотворної здатності.
- Удосконалення технологій використання побутових відходів як джерела відновлюваної енергії.
- Впровадження низькотемпературного спалювання для отримання екологічно чистого палива з побутових відходів у композиціях з твердопаливними пелетами.

Вище наведений аналіз вказує на важливість наших досліджень. Проблема побутових відходів не може бути вирішеною тільки за допомогою одного із методів, тому удосконалення та об'єднання загальнопринятих методологій та технологій є основним аспектом в сфері управління відходами, зменшення їх обсягів та використання їх для відновлювальної енергії.

1.4 Структура накопичення та поводження з побутовими відходами в Україні

Структура накопичення та поводження з побутовими відходами в Україні за період 2010-2022 років демонструє зростання обсягів утворення відходів. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, щорічно в країні утворюється приблизно пів мільярда тонн відходів, з яких понад 90% направляються на звалища. Це підкреслює недостатність інфраструктури для переробки відходів, оскільки сміттєпереробні заводи наразі знаходяться лише на стадії проектування (рис. 1.1, 1.2) [71-78].

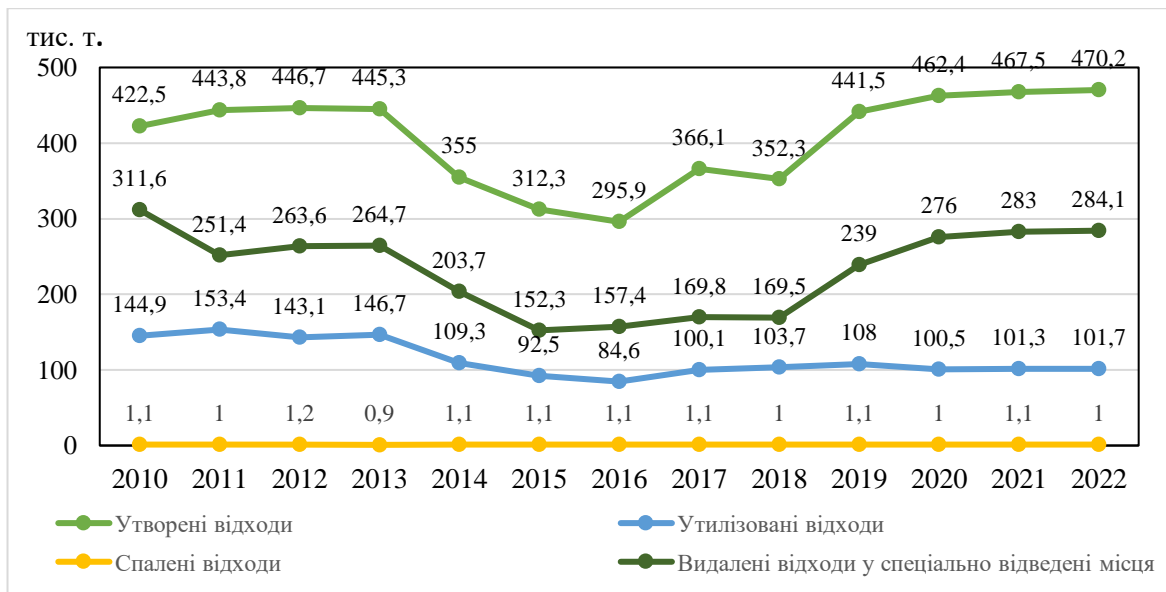


Рисунок 1.1 – Обсяги утворення побутових відходів та способи поводження з ними з 2010-2022 рр.

Аналіз даних за різні роки показує, що обсяги утворених відходів мають тенденцію до зростання, але водночас існують періоди, коли загальний обсяг накопичених відходів зменшувався, як, наприклад, у 2014 році. Це може свідчити про коливання в ефективності управління відходами та переробки. Варто зазначити, що значна кількість відходів, що не підлягають переробці, накопичується на звалищах, що становить потенційну загрозу для довкілля та здоров'я людей.

Структура накопичення та поводження з побутовими відходами в Україні за період 2010-2022 років демонструє зростання обсягів утворення відходів та виклики, пов'язані з їх переробкою та зберіганням. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, щорічно в країні утворюється приблизно пів мільярда тонн відходів, з яких понад 90% направляються на звалища. Це підкреслює недостатність інфраструктури для переробки відходів, оскільки сміттєпереробні заводи наразі знаходяться лише на стадії проектування.

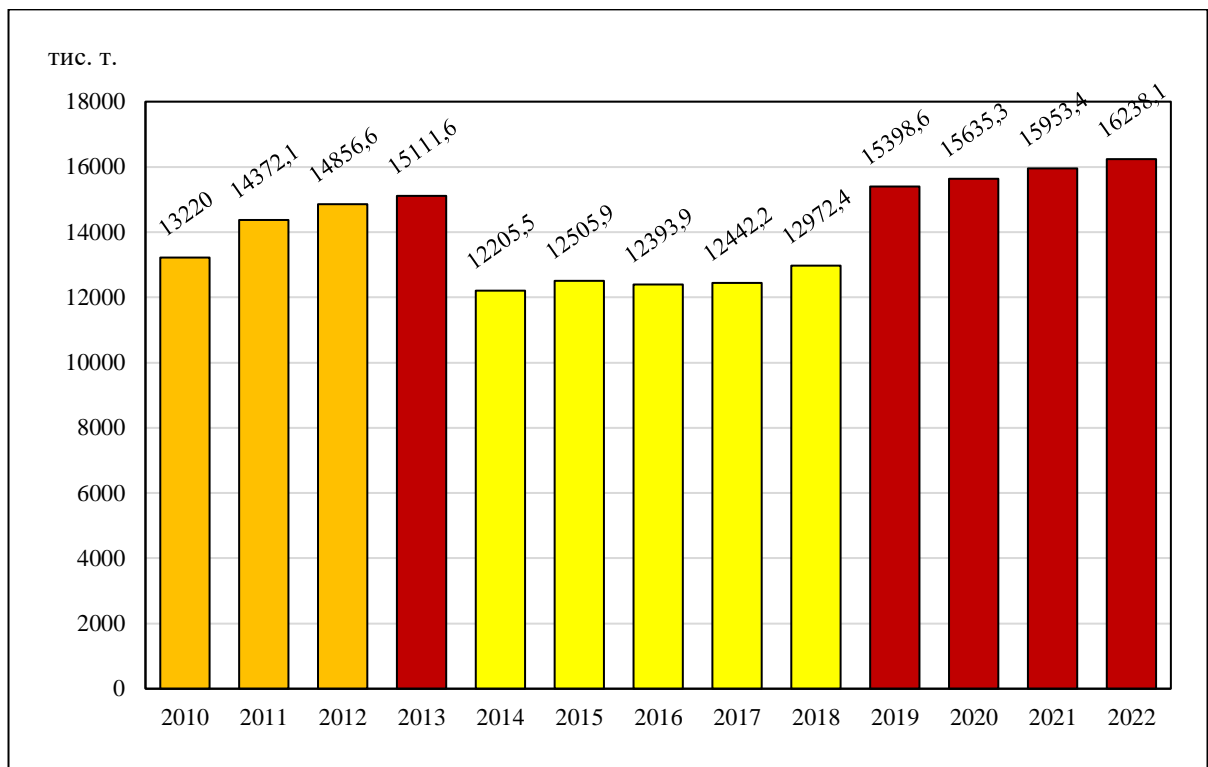


Рисунок 1.2 – Загальний обсяг накопичених відходів у спеціально відведених місцях 2010-2022 рр.

Незважаючи на загальний зростаючий тренд утворення відходів, 2016 рік відзначився рекордно низьким обсягом утворених відходів за весь розглянутий період. Проте, в 2019-2020 роках спостерігалось знову зростання обсягів відходів, що підкреслює необхідність постійного удосконалення системи управління відходами.

Для зменшення навантаження на звалища і поліпшення екологічної ситуації в Україні необхідно активізувати впровадження сучасних технологій

переробки відходів, розробити ефективні програми зменшення обсягу відходів, а також залучити інвестиції для будівництва сміттепереробних заводів.

Також зовсім невеликий обсяг відходів в Україні спалюють – в середньому 1-1,1 млн тонн за рік.

В Україні офіційно налічують 5 455 сміттезвалищ і полігонів загальною площею понад 8,5 тисяч га. Такі дані надає Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України (рис. 1.3).

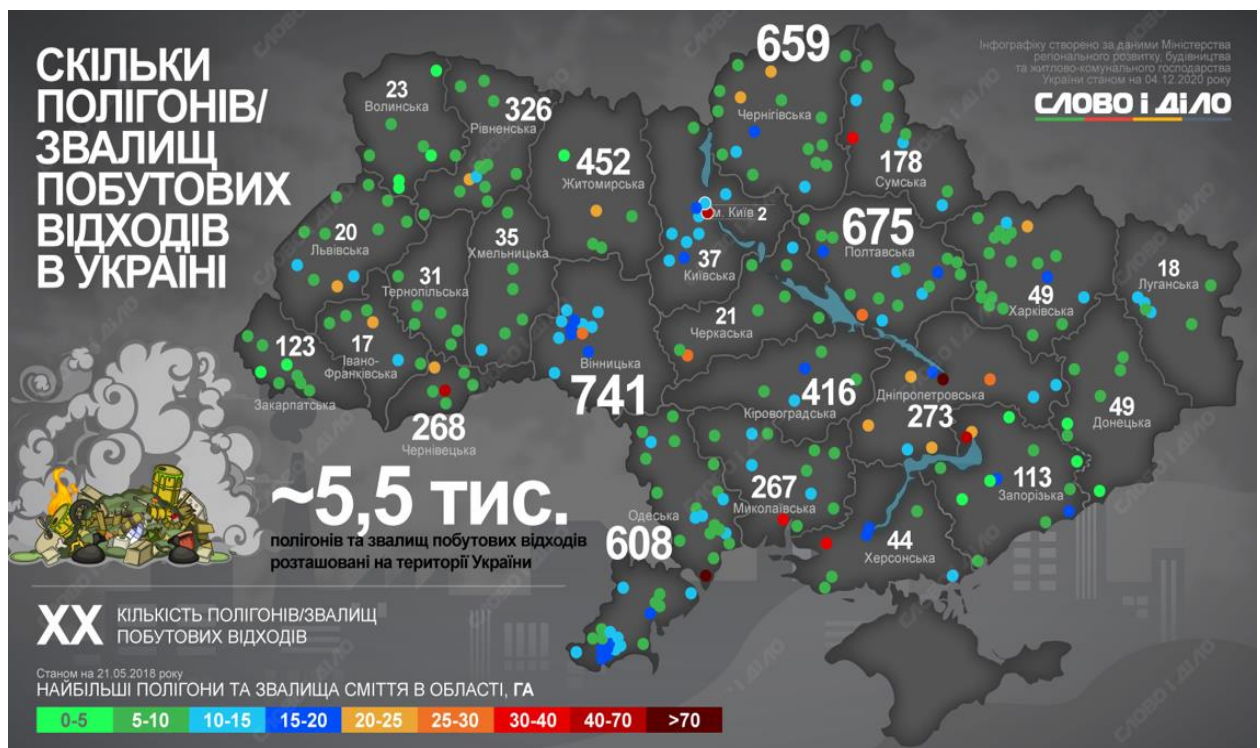


Рисунок 1.3 – Кількість полігонів побутових відходів на території України по-областях [77].

Важливим аспектом є також розвиток системи сортування відходів на рівні домогосподарств та організацій, що дозволить значно підвищити рівень управління побутовими відходами в Україні. Розглянутий нами період відображає декілька ключових тенденцій та викликів. Зокрема, щорічне утворення великої кількості відходів, значна частина яких відправляється на звалища, вказує на недостатню розробленість системи переробки. Ця ситуація

підкреслює критичну потребу в інвестиціях та розвитку інфраструктури для ефективнішого управління відходами.

Наразі в Україні існує велика кількість сміттєзвалищ та полігонів, що створює додатковий тиск на довкілля. Особливо це стосується регіонів з великою кількістю таких об'єктів, як Вінницька, Полтавська, Чернігівська, та Одеська області. Водночас, у деяких областях, таких як Івано-Франківська, Луганська, Львівська, Черкаська, Тернопільська, та Хмельницька, офіційних полігонів побутових відходів значно менше.

Аналіз структури накопичення та поводження з побутовими відходами в Україні вказує на необхідність реформ та впровадження нових технологій у сфері управління відходами. Це включає підвищення ефективності сортування, збору, переробки відходів, а також розробку та реалізацію стратегій для зменшення обсягів утворених відходів. Ключовим елементом успішного вирішення цих проблем є активізація державної підтримки, залучення приватного сектору та впровадження інноваційних рішень на всіх рівнях управління відходами.

1.5 Аналіз динаміки утворення та поводження з побутовими відходами в Івано-Франківській області

Згідно інформації Державної служби статистики України, Міністерства розвитку громад та територій України та Головного управління статистики в Івано-Франківській області, проаналізовано динаміку загального обсягу утворення відходів, структуру утворення відходів за категоріями матеріалів та у розрізі окремих міст і районів області. Досліджено основні тенденції поводження з відходами в Івано-Франківській області, зокрема охарактеризовано динаміку переробки, спалення та видалення відходів I–IV класів небезпеки. Аналіз офіційних статистичних даних показує різке зростання обсягів їх утворення, порівняно з 2000 та 2010 рр. (рис. 1.4) [71].

Під час аналізу динаміки в Івано-Франківській області простежується різке зростання обсягів їх утворення. Якщо у 2000 р. обсяг утворення відходів становив 15,4 тис. тонн, то у 2010 р. він зріс більш ніж у 70 разів і становив 1099 тис. тонн. Аналіз статистичних показників свідчить про ще одне різке зростання обсягу утворених відходів у 2012 р. (до 1782 тис. тонн) [72].

Значне зростання обсягів відходів у 2010 році частково пов'язане з тим, що до державної статистичної звітності щодо обсягів утворення відходів в результаті економічної діяльності і організацій почали включати дані про побутові відходи, утворені в домогосподарствах [72-77].

Як видно з рисунку 1.4, стабільно високим залишається рівень утворення відходів до сьогодні. Максимальне значення показника утворення відходів у Івано-Франківській у 2022 р. (2545,6 тис. тонн) [77].

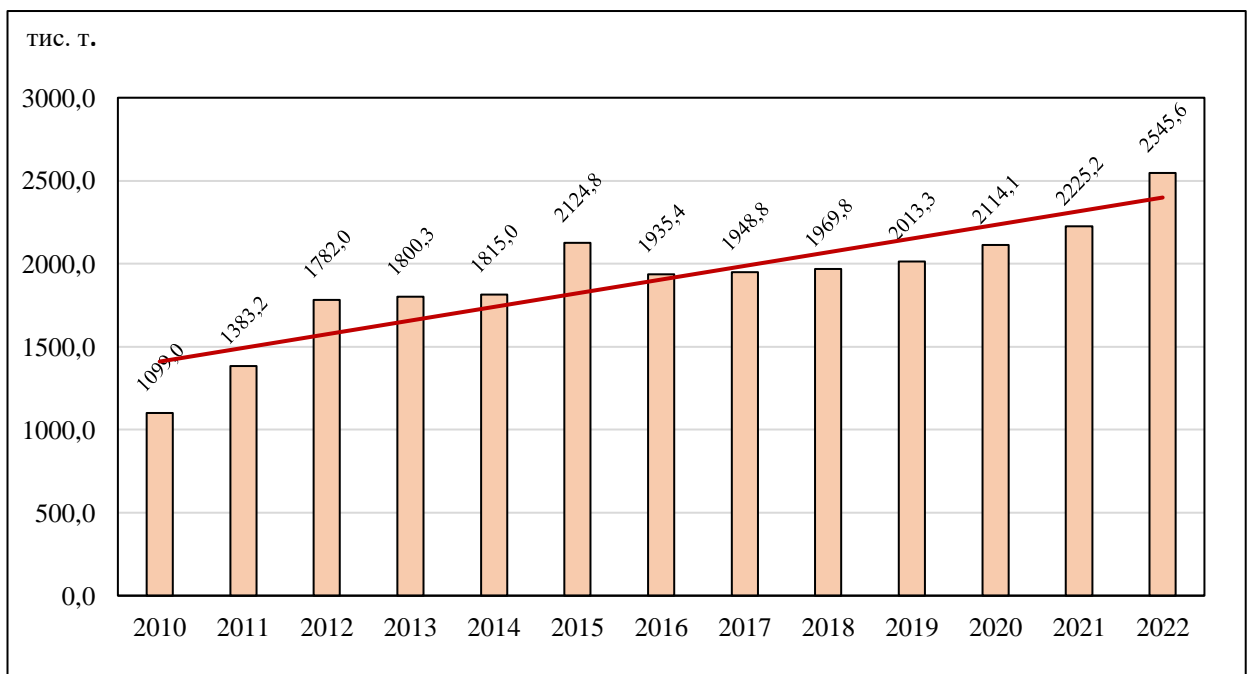


Рисунок 1.4 – Обсяги утворення відходів у Івано-Франківській територіальній громаді з 2000-2018рр.

Домінуючим способом поводження з побутовими відходами в Івано-Франківській області залишається захоронення відходів. У 2019 році на полігони було спрямовано 99,95% побутових відходів і лише 0,53% було перероблено. Побутові відходи, що утворюються в Івано-Франківській

області, нині є основною екологічною проблемою. Недосконала система поводження з побутовими відходами зумовлює їх постійне накопичення та захоронення на звалищах (рис. 1.5) [72].

Спостерігається низький рівень переробки та високий показник їх захоронення. Рівень переробки відходів коливався від 374 тис. тонн у 2011 р. до 681,8 тис. тонн у 2016 р. За останні три роки спостерігається спад у динаміці переробки відходів у середньому на 17%. Натомість обсяг спалених відходів у області впродовж 2010–2015 рр. постійно зростав і за 6 років зріс більш ніж у 7 разів (з 19,2 тис. тонн до 147,5 тис. тонн). Аналіз офіційних статистичних даних показує, що найбільш традиційним способом поводження з відходами є їхнє видалення у спеціально відведені місця. У 2018 р. було видалено 1005,5 тис. тонн. Під час захоронення відходів на полігонах і звалищах відбувається процес забруднення ґрунтів фільтраційними стоками звалищ, що призводить до забруднення підземних вод і негативно впливає на здоров'я людей [71,72].

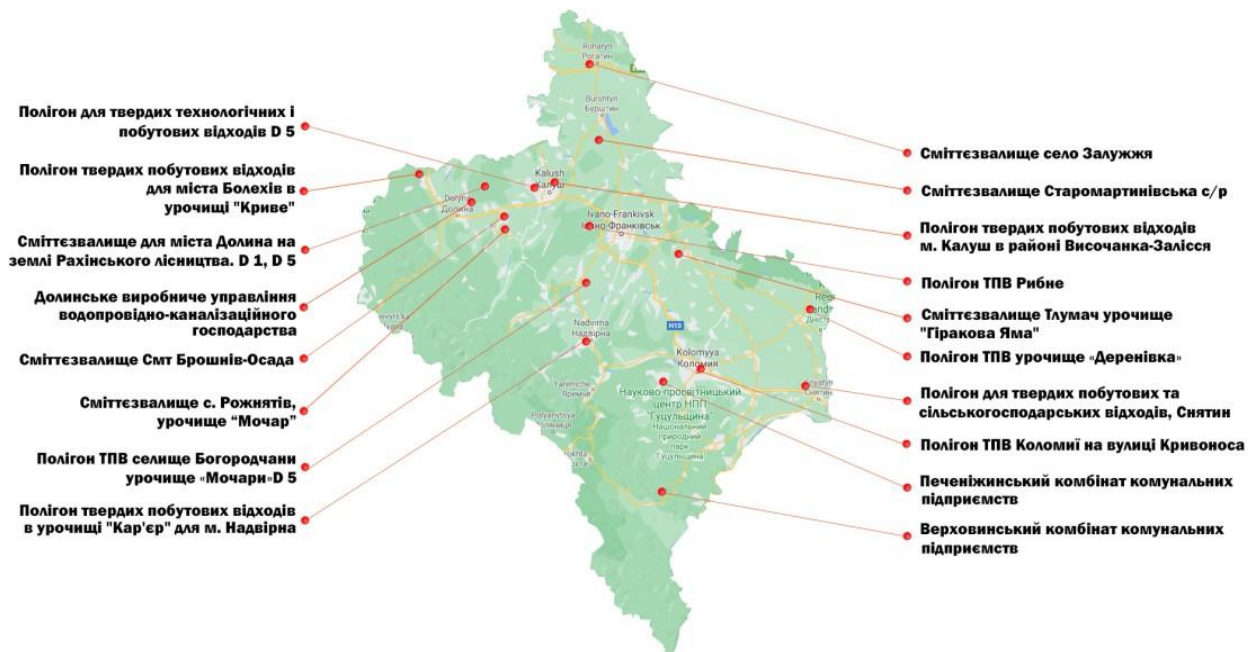


Рисунок 1.5 – Полігони побутових відходів Івано-Франківської області [73].

Висновки до розділу 1

1. Визначено, що побутові відходи, якщо їх не переробляти належним чином, завдають серйозної шкоди навколишньому середовищу, включаючи

забруднення землі, води та повітря. Неналежне збирання та переробка побутових відходів може призвести до проблем з гігієною, збільшення популяції шкідників та поширення захворювань. Відходи та забруднюючі речовини можуть негативно впливати на флору і фауну, зменшуючи біорізноманіття. Розкладання органічних відходів у звалищах призводить до викиду парникових газів, зокрема метану, що є потужним парниковим газом.

2. Встановлено, що Країни Європейського Союзу демонструють високий ступінь усвідомлення необхідності ефективного управління побутовими відходами. Їхнє законодавство спрямоване на зменшення кількості відходів, їх вторинну переробку чи рециклінг. Європейське законодавство фіксує обов'язкові цілі з роздільного збору та переробки відходів, а також використання екологічно чистих технологій у процесі переробки.

Принципи стимулюючого законодавства, такі як відповідальність виробників за рециклінг власних виробів, стимулюють розвиток новітніх технологій переробки та зменшення відходів на виробництві.

3. Визначено основні законодавчі та підзаконні акти. Україна активно працює над вдосконаленням екологічного законодавства у сфері управління побутовими відходами, проте, існують серйозні проблеми у виконанні та реалізації законодавчих актів. Для успішного вирішення проблеми управління побутовими відходами необхідно посилити контроль за виконанням законодавства, забезпечити широку громадську участь у процесі управління відходами та впровадити ефективні механізми моніторингу та контролю за дотриманням нормативів.

4. Проаналізовано обсяги утворення побутових відходів та способи поводження з ними. Визначено, що в Україні недостатньо розвинута інфраструктура для переробки побутових відходів. Необхідно залучати до процесу управління побутовими відходами громадські організації, бізнес та громадянське суспільство для спільної роботи над вирішенням проблеми накопичення та переробки відходів.

Проаналізовано кількість полігонів побутових відходів на території України (по-областях) та встановлено, що необхідно впровадити комплексні програми збору, сортування, переробки та рециклінгу побутових відходів на всіх рівнях - від місцевих до національних.

5. Проаналізовано, що рівень утворення побутових відходів в Івано-Франківській області за останні роки зростає, що свідчить про збільшення споживчих витрат та розвиток населення. Існуюча система управління побутовими відходами в області потребує серйозного удосконалення. Визначено, що інфраструктура збору, сортування та переробки відходів у Івано-Франківській області не відповідає сучасним вимогам, що ускладнює ефективне управління відходами.

Динаміка утворення та управління побутовими відходами в Івано-Франківській області вказує на необхідність негайних заходів для модернізації інфраструктури, поліпшення системи управління та посилення усвідомлення громадськості щодо екологічних проблем.

РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА МЕТОДОЛОГІЙ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Технології Waste-to-Energy (WtE)

За даними Міжнародного енергетичного агентства, біоенергетика стане одним з найперспективніших джерел енергії [79]. Ця галузь енергетики пов'язана з виробництвом і використанням екологічно безпечної, соціально прийнятної та економічно конкурентоспроможної енергії.

Концепція Waste-to-Energy (WtE) передбачає перетворення відходів у придатні для використання форми енергії, як правило, електрику або тепло. Це досягається шляхом спалювання побутових відходів при високих температурах на спеціалізованих заводах (рис. 2.1). Процес зменшує обсяг відходів, виробляє енергію та може зменшити залежність від традиційних методів переробки відходів, таких як захоронення. Це стратегія сталого поводження з відходами, яка сприяє виробленню енергії, одночасно вирішуючи проблеми з переробкою відходів. Проте процесами WtE необхідно ретельно керувати, щоб мінімізувати вплив на навколишнє середовище, особливо викиди [80].

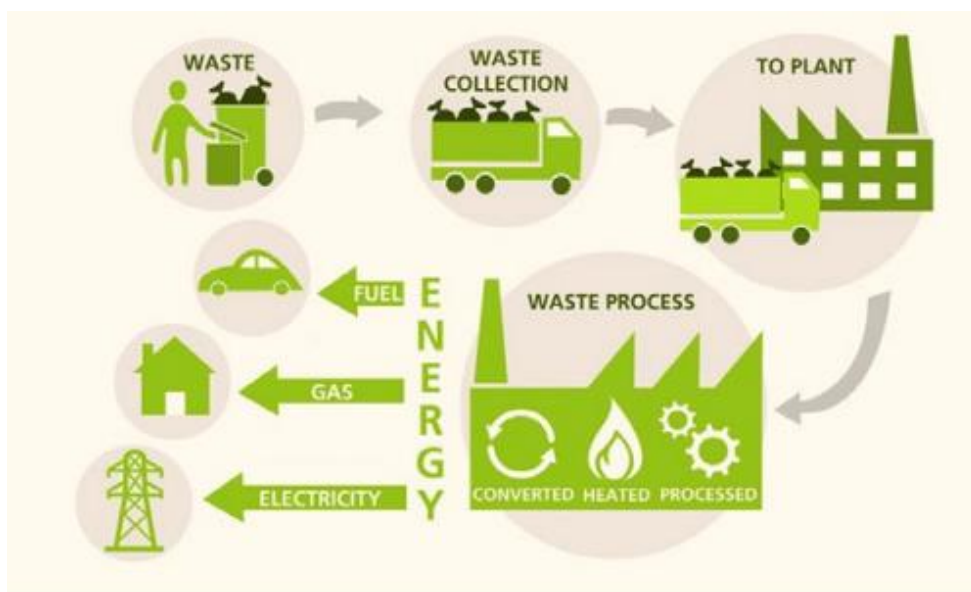


Рисунок 2.1 – Загальний принцип поводження з побутовими відходами згідно технології Waste-to-Energy (WtE) [79].

Поводження з відходами включає збирання, транспортування та поводження з усіма видами відходів (тобто твердими, рідкими, газоподібними, промисловими, побутовими та біологічними). Зібрані відходи транспортуються на завод після розділення відходів. Розділення відходів допомагає застосовувати різні процеси до відходів, такі як компостування, переробка та спалювання. Потім ці процеси виробляють електроенергію, тепло і пару [81].

Процес переробки побутових відходів з отриманням енергії WtE для міських територій умовно можна розділити на 5 основних технологій: [81-87].

1. Спалювання

Контрольований процес що зменшує обсяг і маса комерційних/необроблених побутових відходів на 90% і 75% відповідно. Цей процес робить відходи хімічно інертними через процес горіння, який виділяє енергію у вигляді тепла

2. Спільна обробка

Відновлення енергії та переробка матеріалів з відходів, отриманих у промислових і комерційних процесах. Це відбувається в основному в цементній промисловості та теплових установках. Відходи перетворюються на придатне для спалювання паливо (RDF) за допомогою різних процесів попередньої обробки. Цей процес допомагає запобігти шкідливим викидам (CO , CO_2 , NO_x , SO_x , HCl , HF) у навколишнє середовище.

3. Анаеробне зброджування (AD)

Розкладання біорозкладаних органічних відходів утворює газ із високим вмістом метану, який у 25 разів сильніше впливає на зміну клімату, ніж CO_2 . Ця технологія зменшує викиди метану шляхом перетворення отриманого біогазу в електричну/теплову енергію. Технологія AD набула широкого поширення, особливо в містах

4. Уловлювання звалищного газу

Звалищний газ (ЗГ) містить 45-55% метану, який використовується для виробництва електроенергії. Експлуатація санітарного полігону істотно

пом'якшить негативний вплив на навколишнє середовище шляхом уловлювання газу метану. Однак цей процес не вважається ефективною технологією WtE через його недоліки, такі як забруднення повітря, забруднення ґрунтових вод і неприємний запах [88].

5. Альтернативні технології

У порівнянні зі спалюванням, піроліз є альтернативним рішенням, яке називають екологічно безпечною технологією. Цей процес зменшує об'єм і масу відходів, уможливаючи рекуперацію енергії та повторну переробку вмісту хімічних речовин/матеріалів. Перероблені продукти, такі як нафта, кокс і синтетичний газ, або перетворюються на біодизель, або використовуються як сировина на електростанціях. Цей процес є життєздатним варіантом для високоорганізованої системи переробки відходів [88].

Одна з гострих проблем сьогоденної України - переробка промислових і побутових відходів. Згідно зі статистикою, на кожного жителя країни припадає близько 300 тонн накопичених відходів. Всього функціонує близько 35 тис. полігонів із захоронення відходів, площа яких перевищує 12 тис. гектарів [81].

Розв'язання проблеми накопичення побутових відходів вимагає радикальних змін у методах санітарної очистки населених пунктів, збільшення відповідальності жителів та організацій за правильне поводження з відходами та застосування передового досвіду країн з високим рівнем переробки відходів.

В Україні в різний час працювало 5 сміттєспалювальних заводів (Київ, Дніпро, Харків, Рівне та окупований сьогодні Севастополь), з яких на даний час діє лише завод «Енергія» в Києві. Сьогодні, на підприємстві гостро стоїть питання впровадження хімічного очищення димових газів [81].

Подібні проблеми притаманні для всіх сміттєспалювальних виробництв. Сучасні технології очищення димових газів дозволяють повністю нейтралізувати негативну дію цих речовин. Тому в розвинених країнах не існує обмежень по розташуванню сміттєспалювальних заводів. Є безліч

прикладів розміщення таких підприємств навіть в центрі міст - прикладами є Токіо, Цюріх, або Ліон. Найяскравіший приклад - завод «Шпіттелау» у Відні, який розміщений в центрі австрійської столиці (рис. 2.2) [82].



Рисунок 2.2. – Загальний вигляд заводу Шепітелау (Відень) [82].

Загальноприйнятий метод розміщення як небезпечних, так і побутових відходів – полігонне захоронення. За оцінками фахівців, в європейських країнах щорічно утворюється 24 млн. т. небезпечних відходів, з них 75 % захоронюється. За даних умов полігонне захоронення вважається найменш доцільним для відходів, які можна піддавати рециклінгу (переробка відходів для повторного використання), використати для одержання альтернативних видів палива. У ЄС найпоширенішим є сміттєспалювання, яке виникло як спосіб знешкодження побутових відходів і згодом перетворилося на енергетичну індустрію, оскільки за тепловим еквівалентом 1 тонна побутових відходів прирівнюється до 0,5 тонни вугілля [83].

Спалювання побутових відходів дозволяє значно знизити їх обсяг і вагу; перетворити речовини (у тому числі й небезпечні) в інертні тверді. До недоліків відносяться високі енергозатрати процесу, забруднення довкілля шкідливими газоподібними викидами, а також накопичення продуктів спалювання у виді зол і шлаків. Проблемами переробки шлаків спалених

відходів та використання їх для одержання будівельних матеріалів займалися науковці НУ «Львівська політехніка» та Технічного університету Сержі Понтуаз (Франція) [83]. Альтернативою спалюванню за температур 700–800 °С за кордоном сьогодні інтенсивно ведуться науково-технічні розробки зі створення процесів і агрегатів високотемпературної переробки (1350...1600 °С) – піролізу [84].

Для багатьох країн світу гостро стоїть проблема переробки відходів. Це стосується як економічно розвинених країн, так і країн що розвиваються. Для вирішення питання переробки відходів в Україні в 2017 р. розроблена Національна стратегія з управління відходами, що передбачає план до 2030 р. Даною Стратегією планувалось зменшення кількості захоронення побутових відходів на сміттєвих полігонах з 95 % (у 2016 році) до 50 % у 2023 році і до 30 % у 2030 році. Проте реальні показники не відповідають заданому плану: ця кількість у 2018 скоротилась лише на 1,2 % [84].

Теперішній склад побутових відходів істотно змінився у порівнянні з минулими роками. У побутових відходах істотно зменшився вміст металу і скляної тари, проте з використанням сучасних видів упаковки до 40-45% зріс обсяг пластику і полімерних матеріалів, а також паперу. А це вуглецева сировина, горіння якої відбувається з виділенням теплової енергії, тому технології сміттєспалювання широко використовуються для знешкодження побутових відходів.

Сміттєспалювальні заводи знайшли широке застосування в країнах з високою густотою населення (ФРН, Японія, Швейцарія, Бельгія та ін.), в більшості розвинених країн переважає термічний спосіб знешкодження побутових відходів (так, в Японії спалюється 82% відходів, в США - 81%, в Данії - 78%) (рис. 2.3). Для прикладу можна розглянути сміттєспалювальний заводу Завдяки застосуванню найкращих доступних технологій, якими вважаються спалювання відходів в печах на механічних колошникових решітках і печах з вихровим киплячим шаром з багатоступеневою системою

газоочищення, проблеми екологічної безпечної експлуатації сміттєспалювальних заводів практично вирішені [85].

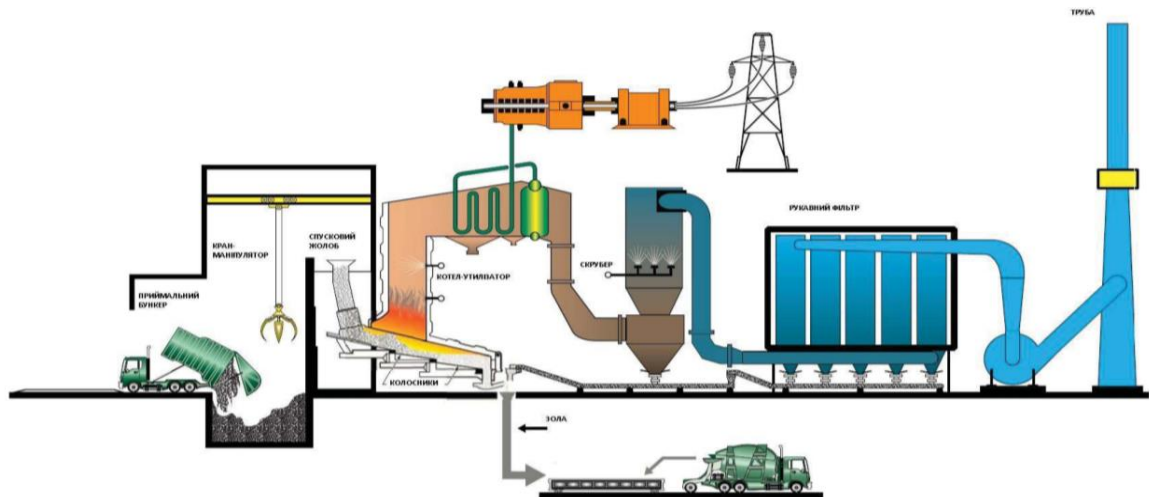


Рисунок 2.3 – Загальна принципова схема сміттєспалювального заводу [85].

Сучасні методи термічної переробки охоплюють такі процеси як газифікація, піроліз та плазмову газифікацію. Ці підходи характеризуються складними технологічними операціями і мають обмежений досвід застосування на промисловому рівні.

Для будь-якого процесу термічного знешкодження відходів характерні три стадії, які перекриваються, але можуть бути розділені в просторі і часі [83].

- сушіння і дегазація (видалення летких речовин при 100-300°C);
- піроліз та газифікація включають розщеплення органічних матеріалів без доступу кисню при температурі від 250 до 700°C, що призводить до утворення синтез-газу (водню і монооксиду вуглецю), смоли та вуглецевого залишку;
- окислення горючих газів (синтез-газу) при 800 – 1450°C.

Ці методи переробки поділяються на дві головні групи: традиційне спалювання та інноваційні техніки термічної обробки. Традиційне спалювання охоплює загальне спалювання та спалювання у флюїдизованому (киплячому) шарі, які застосовуються по всьому світу.

Таблиця 2.1 – SWOT-аналіз технології одностадійного спалювання із колосниковими решітками

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ol style="list-style-type: none"> Ефективне спалювання: Забезпечує ефективне спалювання твердих видів палива з різним розміром частинок, зокрема біомаси з високою вологістю та високою зольністю. Адаптивність: Може адаптуватися до різних типів твердого палива, включаючи відходи деревини, що робить технологію гнучкою для різних умов експлуатації. Автоматизація процесу: Механічні шарові топки з ланцюговими решітками дозволяють автоматизувати процес подачі палива та видалення золи, що знижує потребу в ручній праці. Екологічна чистота: Спалювання біомаси є відносно чистим процесом, оскільки вуглець, що виділяється при спалюванні, вважається нейтральним з точки зору впливу на клімат. Ефективне використання палива: Завдяки керованому процесу спалювання та ефективному перемішуванню повітря і палива, досягається висока теплова ефективність. 	<ol style="list-style-type: none"> Висока вартість установки: Початкові капіталовкладення можуть бути значними через складність конструкції та необхідність інтеграції автоматизованих систем керування. Обмеження на тип палива: Не всі види біомаси підходять для спалювання за цією технологією, особливо якщо вони містять велику кількість золи або мають низьку температуру плавлення золи, що може призвести до утворення шлаку. Технічне обслуговування: Складність системи вимагає регулярного технічного обслуговування та кваліфікованого персоналу для управління процесом та усунення несправностей. Викиди: Попри те, що спалювання біомаси є відносно чистим існують питання з викидами, такі як викиди оксидів азоту та інших шкідливих речовин, які можуть виникати під час спалювання, особливо якщо не забезпечено достатнє змішування та оптимізація умов горіння.
Можливості	Загрози
<ol style="list-style-type: none"> Розвиток відновлюваних джерел енергії: Технологія підтримує використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біомаси, що сприяє зменшенню залежності від викопного палива. Локальне виробництво енергії: Можливість використання місцевих ресурсів для виробництва енергії, зменшуючи транспортні витрати та сприяючи місцевому економічному розвитку. Зниження викидів CO₂: Використання біомаси може сприяти зниженню викидів парникових газів порівняно з традиційними викопними паливами. Переробка відходів: Можливість використовувати відходи деревообробки та сільськогосподарські відходи для виробництва енергії, зменшуючи проблему відходів. 	<ol style="list-style-type: none"> Конкуренція з іншими видами енергії: Висока конкуренція з альтернативними та більш чистими технологіями виробництва енергії може вплинути на її привабливість. Зміни цін на паливо: Зміни цін на біомасу та інші види палива можуть вплинути на економічну ефективність технології. Технічні труднощі: Потенційні труднощі з управлінням процесом спалюванням, зносом обладнання та необхідністю висококваліфікованого обслуговуючого персоналу можуть збільшити витрати на експлуатацію та обслуговування.

Найбільш поширеним масовим спалюванням є одностадійне спалювання на похилих або рухомих колошникових решітках (табл. 2.1) [83]. В установці для масового спалювання необхідна мінімальна попередня обробка побутових відходів (рис. 2.4). Як правило, з потоку вилучаються великогабаритні і негорючі матеріали.

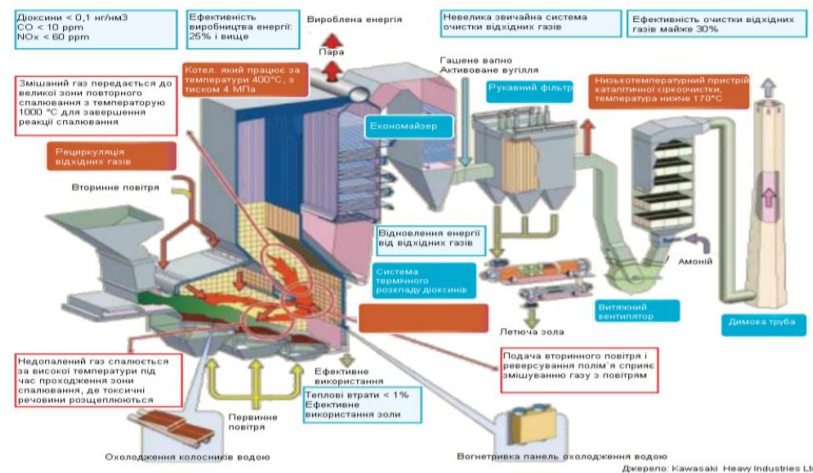


Рисунок 2.4 – Технологія одностадійного спалювання із колосниковими решітками [85].

При одностадійному спалюванні відходи спалюються без надлишку кисню, що спричиняє їх неповне згоряння і утворення піролітичного газу, який у верхній частині камери згоряння сполучається з надлишковим повітрям і згоряє повністю. За цією технологією відходи довгий час перебувають на решітках, що спричиняє хорошу якість шлаку (з меншою кількістю незгорілого вуглецю). Звичайні установки мають енергоефективність 14-27%, якщо енергія перетворюється в електроенергію, вони складаються з кількох модулів зі спільною інфраструктурою [85]. Двостадійне спалювання включає обробку відхідних газів на другому етапі у середовищі зі збільшеним вмістом кисню та передачу тепла до котла-утилізатора. Спалювання у флюїдизованому шарі включає подрібнення відходів, їх сортування та видалення металічних компонентів для створення більш гомогенного твердого палива (рис. 1.9). Після цього паливо подається до камери згоряння, де воно спалюється в умовах, коли інертний матеріал (наприклад, пісок) підтримується у зваженому стані на колошниковій решітці за рахунок продування повітря знизу.

Таблиця 2.2 – SWOT-аналіз технології спалювання побутових відходів у киплячому шарі

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ol style="list-style-type: none"> Ефективне пригнічення оксидів азоту: У низькотемпературних киплячих шарах (800-900°C) ефективно пригнічується виділення оксидів азоту, що є важливим з огляду на екологічні стандарти. Висока тепловіддача: Завдяки використанню інертних наповнювачів (шлак, пісок, доломіт, вапняк) забезпечується підвищена тепловіддача, а також уловлювання до 90% оксидів сірки. 	<ol style="list-style-type: none"> Попередня обробка відходів: Необхідність у попередньому сортуванні та дробленні відходів може збільшити загальні витрати на обробку. Управління залишковими продуктами: Необхідність в управлінні шлаком та сипкою золою, які можуть містити токсичні речовини.
Можливості	Загрози
<ol style="list-style-type: none"> Зниження залежності від викопного палива: Використання відходів як джерела енергії зменшує залежність від викопних видів палива та сприяє поводженню з відходами. Технологічні удосконалення: Інновації у технології спалювання можуть покращити ефективність та знизити екологічний вплив. 	<ol style="list-style-type: none"> Екологічні регуляції: Суворі норми щодо викидів можуть обмежити застосування або збільшити витрати на очищення відхідних газів. Зміна відходів: Зміни у складі побутових відходів можуть вплинути на ефективність спалювання та якість залишкових продуктів.

Із 450 об'єктів в Європі, флюїдизоване спалювання застосовується на 30 з них, де крім побутових відходів також спалюються осади стічних вод, відсортовані біовідходи та деревна тирса. Однак, серед недоліків цієї технології - виробництво значної кількості леткої золи (табл. 2.2).

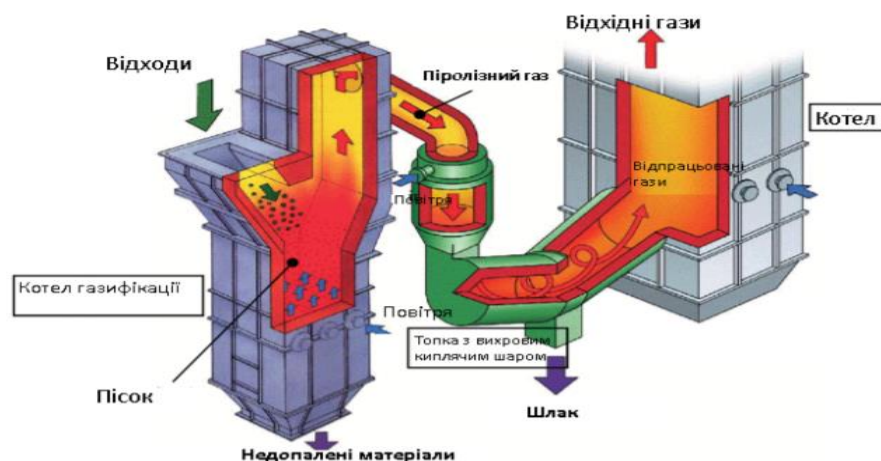


Рисунок 2.5 – Технологія спалювання побутових відходів у киплячому шарі [85].

Таким чином, установки для звичайного спалювання побутових відходів характеризуються утворенням шкідливих викидів, кількість яких з кожним роком поступово зменшується за рахунок використання систем знешкодження атмосферних викидів. Ці системи базуються на сухому, напівсухому та мокрому очищенні відхідних газів [85].

В розвинених країнах практично відмовились від звичайного одностадійного спалювання – на заміну йому прийшли двостадійні процеси, один з яких виключає утворення діоксинів та фуранів і забезпечує гарантоване знешкодження небезпечних відходів при високих температурах [86].

Піроліз представляє собою процес термічного розкладу органічних матеріалів в умовах відсутності кисню при температурах від 450 до 800°C, що є більш енергоефективним порівняно зі звичайним спалюванням (табл. 2.3). У результаті піролізу утворюються горючий газ та твердий залишок, які потім можуть бути використані як паливо у печах без додаткової обробки. Деякі з газів, отриманих під час піролізу, можуть бути конденсовані та перетворені на рідке паливо (рис. 2.6).

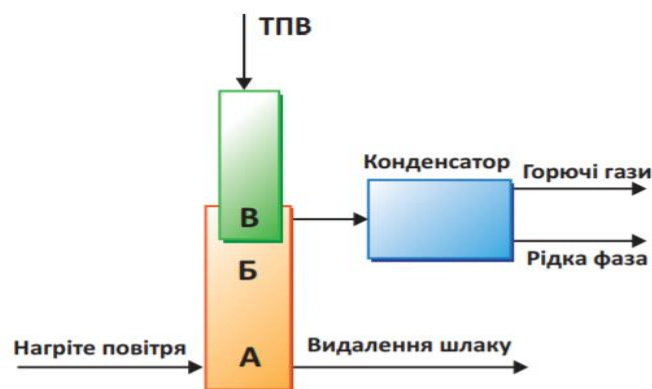


Рисунок 2.6 – Технологічна схема піролізу побутових відходів [85].

Піроліз поділяє деякі з недоліків з безпосереднім спалюванням відходів, зокрема, необхідність очищення піролізного газу від кислотних компонентів, таких як хлористий водень (HCl). Цей аспект робить процес відносно вартісним через потребу в спеціалізованому обладнанні та використанні реагентів, наприклад, каустичної соди або кальцинованої соди. Крім того,

існує ризик забруднення навколишнього середовища важкими металами, який не можна повністю усунути.

Таблиця 2.3 – SWOT-аналіз технології піролізу побутових відходів

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ol style="list-style-type: none"> Ефективне перетворення побутових відходів: Піроліз дозволяє перетворювати побутових відходів, включаючи полімери, вугілля та гуму, на корисні продукти, такі як газ, мазут і золу. Відсутність необхідності попереднього сортування: Високотемпературний піроліз може обробляти відходи без попереднього сортування, використовуючи низькоякісний матеріал. Переробка небезпечних речовин: Піроліз дозволяє знищувати шкідливі речовини, які містяться в пластмасі. 	<ol style="list-style-type: none"> Високі капітальні витрати: Початкове інвестування в установки піролізу може бути значним. Технічні складнощі: Управління процесом піролізу вимагає спеціалізованих знань і навичок. Обмеження на типи відходів: Не всі типи відходів можуть бути ефективно перероблені за допомогою піролізу. Потреба в додатковій обробці продуктів: Продукти піролізу, такі як синтетична нафта, потребують подальшої очистки перед використанням. Ризик забруднення: Існує потенціал забруднення повітря і води побічними продуктами піролізу.
Можливості	Загрози
<ol style="list-style-type: none"> Зростання обсягів відходів: Стрімке зростання утворення відходів вимагає ефективних методів переробки, піроліз може стати одним з рішень. Розвиток технологій: Інновації можуть знизити вартість та покращити ефективність піролізу. Співпраця з державним сектором: Державні ініціативи та програми підтримки можуть сприяти розвитку та впровадженню піролізних проектів. 	<ol style="list-style-type: none"> Конкуренція з іншими методами переробки: Традиційні та новітні методи переробки відходів можуть конкурувати з піролізом. Регуляторні обмеження: Суворі екологічні стандарти та норми можуть обмежувати використання піролізу в деяких регіонах. Соціальне неприйняття: Громадське неприйняття технологій, пов'язаних із переробкою відходів, особливо з використанням термічних процесів. Економічна нестабільність: Зміни в економіці можуть вплинути на доступність інвестицій та вартість виробництва. Технічні ризики: Потенційні непередбачені складнощі та поломки в процесі піролізу, що можуть призвести до зупинки виробництва чи забруднення.

Високотемпературний піроліз – один з найперспективніших напрямів перероблення побутових відходів з погляду як екологічної безпеки, так і отримання вторинних корисних продуктів: синтез-газу, рідкого палива, металів та інших матеріалів, які можна широко застосовувати в народному господарстві (рис. 2.7). Високотемпературна газифікація дає можливість економічно вигідно і технічно відносно просто переробляти побутові відходи без їх попередньої підготовки, тобто сортування, сушіння та ін [85].

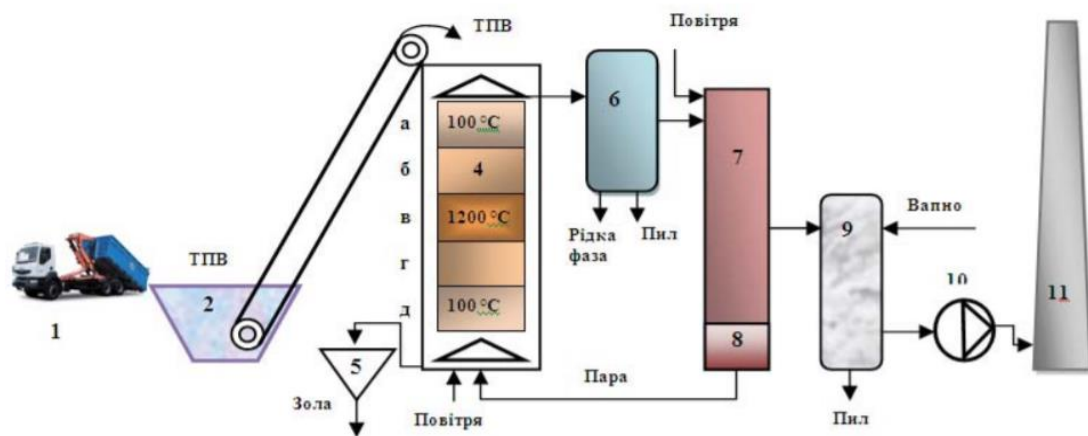


Рисунок 2.7 – Технологічна схема переробки побутових відходів методом високотемпературного піролізу [85].

Ключовими складниками газу, що утворюється під час піролізу, є водень, монооксид вуглецю та метан, при цьому теплова енергія цієї суміші може варіюватися від 6680 до 10450 кДж/м³ залежно від типу відходів і умов процесу. Частина енергії отриманого газу використовують для нагрівання повітря, яке подається у зону горіння реактора. Решта енергії може бути передана споживачам як у формі газового палива, так і у вигляді теплоносіїв. Піролізний газ має переваги перед природним газом через відсутність у ньому сірчаних і азотних сполук (табл. 2.4).

Проте, через відносно низьку теплоту згорання, складнощі з акумуляцією та зберіганням, транспортування піролізного газу на далекі відстані є непрактичним, обмежуючи його використання регіонами, що розташовані не далі ніж на 3 км від місця виробництва.

В майбутньому цей комплекс може стати рішенням для проблеми ліквідації відходів як у регіональному центрі, так і в усій області. Втілення подібних ініціатив не тільки поліпшить управління відходами, але й сприятиме створенню нових робочих місць.

Таблиця 2.4 – SWOT-аналіз технології високотемпературного піролізу побутових відходів

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ol style="list-style-type: none"> 1. Ефективність переробки: Високотемпературний піроліз дозволяє високоєфективно перетворювати відходи на корисні продукти. 2. Енергетична ефективність: Процес виробляє тепло, яке може бути використано для генерації електроенергії або інших енергетичних потреб. 3. Можливість використання сировини: Піроліз може обробляти широкий спектр побутових відходів, включаючи пластмаси та органічні матеріали. 4. Зменшення обсягів побутових відходів: Допомогає знижувати обсяги відходів, що потрапляють на полігони побутових відходів. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Високі капітальні витрати: Створення та утримання установок для високотемпературного піролізу може бути вкрай витратним. 2. Технічні виклики: Управління та підтримка обладнання вимагає спеціалізованих знань і ресурсів. 3. Емісія забруднюючих речовин: Під час піролізу можуть виділятися забруднюючі речовини, які потребують подальшої очистки. 4. Потреба в стандартизації: Регуляторні стандарти щодо піролізу відходів можуть бути незрозумілими або суперечливими. 5. Залежність від сировини: Успішність процесу піролізу може бути залежною від якості та складу відходів.
Можливості	Загрози
<ol style="list-style-type: none"> 1. Державна підтримка: Державні програми та ініціативи з підтримки сталих технологій можуть стимулювати розвиток піролізних проектів. 2. Ринок вторинних продуктів: Зростаючий попит на вторинні продукти, які можна отримати під час піролізу, наприклад, синтетичну нафту. 3. Співпраця з громадськістю: Співпраця з громадськістю та пояснювальна робота можуть зменшити соціальний опір впровадженню піролізу. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Зміни у нормативних показників: Суворі регуляторні вимоги щодо емісій та безпеки можуть вплинути на вартість і відповідність піролізних установок. 2. Громадський опір: Опозиція з боку громадськості або місцевих органів може ускладнити отримання дозволів та реалізацію проектів. 3. Економічні фактори: Зміни на ринку енергії та сировини можуть вплинути на економічну прибутковість піролізу. 4. Технічні непередбаченості: Технічні поломки або непередбачені складнощі можуть призвести до зупинки виробництва та втрат.

Парогазові установки або газові турбіни стають стандартним обладнанням на таких заводах, забезпечуючи високоефективне виробництво електричної та теплової енергії.

Інтеграція піролізної установки в підприємство, що спеціалізується на сортуванні відходів дозволяє досягти майже повної переробки відходів, зі зменшенням залишкового об'єму до 3-5% від первісної кількості. В результаті отримують технічний вуглець та рідке паливо, а вироблена енергія використовується для потреб самого заводу.

Однією з ключових проблем у роботі таких заводів, крім очистки викидних газів, є переробка чи зберігання токсичної золи, яка становить до 30% від сухої ваги побутових відходів, що залишається після процесу спалювання.

Найефективніша деструкція компонентів побутових відходів досягається за допомогою високотемпературного піролізу або газифікації, коли температура досягає 1650 – 1930°C у середовищі розплавленої мінеральної маси з додаванням металів або при температурі до 1700 °C у розплаві солей чи лугів з каталізаторами, за технологією MSOP. Такі методи дозволяють переробляти відходи різного складу, ефективно знищуючи всі діоксини, фурани та поліхлоровані біфеніли. В результаті утворюється синтез-газ, який складається з водню, метану, монооксиду вуглецю, двооксиду вуглецю, водяної пари, оксидів азоту та сірки, а також твердий решток, який виводиться з реактора спеціальною системою. Очищений синтез-газ можна використовувати як паливо, сировину для хімічної промисловості або для виробництва рідких вуглеводнів, таких як метанол або бензин [86].

Цей метод переробки побутових відходів є найбільш перспективним для України, оскільки дозволяє одночасно вирішувати три важливих проблеми сьогодення, що стосуються:

- 1) екологічної безпеки, оскільки у перспективі дозволить відмовитися від звалищ та полігонів побутових відходів у їх сьогоденньому вигляді;

- 2) енергетичної безпеки, оскільки дозволить частково покривати дефіцит рідких та газоподібних вуглеводнів в енергетиці;
- 3) часткового покриття дефіциту вуглеводневої сировини, що очікується невдовзі у хімічній промисловості.

Однією з найбільш сучасних способів поводження з відходами є механіко-біологічний спосіб, який дає змогу повної комплексної переробки побутових відходів щоденного утворення, накопичені застарілі відходи полігонів, промислових відходів та ін. Крім того, ця технологія дає можливість повністю переробляти всі 100% побутові відходи, які постачаються, та отримувати наступні продукти [87]. RDF (Refuse-Derived Fuel), відомий як ССЗ (сухий стабільний залишок), представляє собою альтернативний вид палива, тепловий потенціал якого втричі перевищує такий у бурого вугілля і становить не менше 50% від загальної маси побутових відходів (табл. 2.5):

1. Вода - очищена, придатна для використання в сільському господарстві (зрошення), обслуговуванні потреб заводу тощо, в кількості близько 30% від маси побутових відходів.
2. Вторинна сировина: метали, скло, щебінь, в кількості близько 20% від вступника побутових відходів.

Принципова схема наведена на рисунку 2.8. За цією технологією побутові відходи переробляють механіко-біологічним способом.

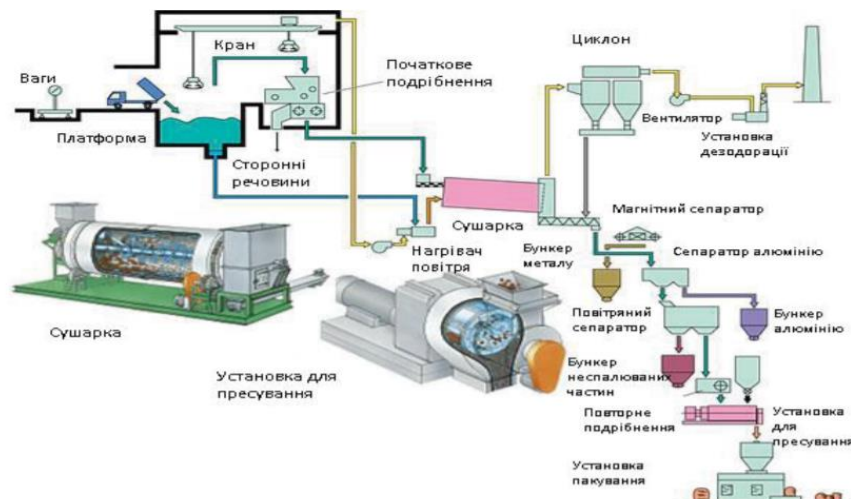


Рисунок 2.8 – Принципова схема установки для утворення альтернативного палива з побутових відходів – RDF [87].

Таблиця 2.5 – SWOT-аналіз технології RDF

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ol style="list-style-type: none"> Ефективність використання відходів: RDF дозволяє використовувати різноманітні відходи, включаючи побутові відходи, для виробництва палива. Зменшення обсягів відходів: Перетворення відходів в RDF допомагає зменшити обсяги відходів на полігонах побутових відходів. Джерело енергії: RDF може слугувати джерелом енергії для виробництва тепла та електроенергії. Зменшення викидів: За допомогою RDF можна знизити викиди парникових газів і інших забруднюючих речовин у порівнянні з іншими методами переробки відходів. Потенціал для вторинних ресурсів: В процесі RDF можливе утворення вторинних ресурсів, які можна подальше використовувати. 	<ol style="list-style-type: none"> Технічні складнощі: Виробництво RDF може вимагати високотехнологічного обладнання та технічної експертизи. Вартість обладнання: Встановлення та утримання устаткування для виробництва RDF може бути витратним. Якість вихідного палива: Якість RDF може коливатися в залежності від складу вихідних відходів. Потреба в сортуванні: Для виробництва високоякісного RDF може знадобитися сортування відходів, що підвищує витрати. Регулювання: Потреба в відповідності до регулювальних норм і стандартів може бути викликом.
Можливості	Загрози
<ol style="list-style-type: none"> Збільшення обсягів використання відходів: Зі зростанням усвідомлення екологічних проблем може збільшитися попит на RDF. Технологічні інновації: Інновації у процесах виробництва RDF можуть підвищити його ефективність і якість. Підтримка держави: Державні програми і стимули можуть сприяти розвитку технології RDF. Співпраця зі стороною громадськості: Співпраця та взаєморозуміння з громадськістю можуть забезпечити підтримку проектів RDF. Ринок відновлювальних джерел енергії: За підтримки ринку відновлювальних джерел енергії RDF може стати конкурентоспроможним джерелом енергії. 	<ol style="list-style-type: none"> Конкуренція з іншими джерелами енергії: RDF конкурує з іншими джерелами енергії, такими як вугілля, газ і сонячна енергія. Зміни в регулюванні: Зміни в законодавстві щодо енергетики та переробки відходів можуть вплинути на статус і економічну прибутковість RDF. Мінливість складу відходів: Зміна складу вихідних відходів може вплинути на якість та вартість RDF. Фінансова стабільність: Економічні труднощі можуть вплинути на інвестиції в технологію RDF. Соціальний опір: Громадський опір або негативне ставлення до виробництва RDF можуть ускладнити реалізацію проектів.

За технологією виділяється суха фракція побутових відходів після біологічної сушки на автоматичній лінії та розділяються матеріали для повторного використання. Більше 50% побутових відходів перетворюється таким чином у високоякісне вторинне паливо, так звану суху фракцію, яка використовується на підприємствах, що виробляють цемент, гіпс і інші будівельні матеріали, а також електростанціях для виробництва енергії [87].

Побутові відходи спочатку проходять процес подрібнення, що полегшує наступне сортування. Завантаження в подрібнювач здійснюється автоматично за допомогою крана з комп'ютеризованою системою управління. Нагляд за роботою устаткування на заводі ведеться з центрального пункту керування одним дежурним диспетчером.

Біологічне висушування побутових відходів є ключовою стадією їх подальшої переробки. Щоб можна було ефективно розділити і відсортувати відходи, спочатку їх потрібно висушити. Після цього сухі відходи переміщуються на механічну обробку за допомогою транспортних конвеєрів до агрегатів для сепарації. Розділення матеріалів здійснюється за розміром на пневматичних сортувальних столах та в повітряних сепараторах, де легші матеріали, такі як папір, деревина, пластик і текстиль, відділяються від більш важких неорганічних матеріалів, таких як скло, кераміка, камінь і метали, за допомогою повітряних потоків. Для досягнення більш точного розділення за щільністю, деякі матеріали проходять додаткову сепарацію за допомогою вібросит, що дозволяє поділити їх на більш дрібні категорії. Подрібнювачі, які використовуються в цьому процесі, вирізняються високою ефективністю, тривалим терміном служби та низькими витратами на обслуговування.

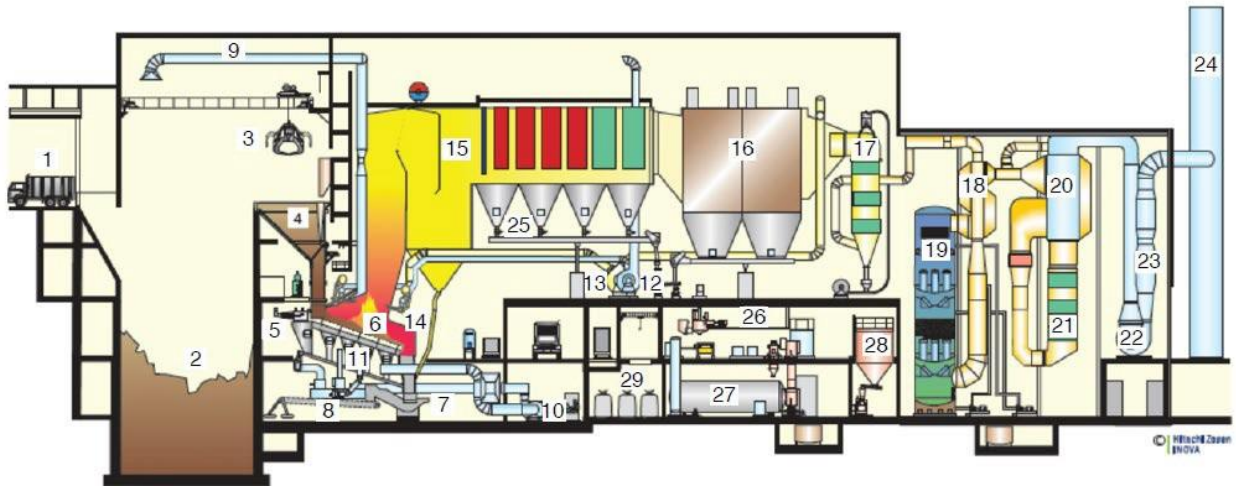
У комплексній комбінації різних матеріалів найчастіше зустрічаються композиційні матеріали, які не піддаються вищенаведеній технології поділу. До них відносяться насамперед використані батарейки і хлорвміщуючі синтетичні матеріали. Як при спалюванні так і розміщенні на звалищі в необробленому вигляді ці матеріали завдають шкоди навколишньому середовищу, тому вони мають бути вилучені вручну і перероблені за

допомогою спеціальних методів. Протягом транспортування сухих відходів виділяється пил. У комплексі з переробки побутових відходів цей пил відсмоктується, фільтрується і підмішується до сухої фракції. Після завершення цих біологічних і механічних процесів корисні матеріали, такі як пластмаси, папір і дерево комплектуються в високоякісне паливо ССЗ. У пресах-грануляторах суха фракція переробляється в пухку масу або гранулюється, після чого вантажиться на автомобілі і транспортується для енергетичної переробки в промислових енергетичних установках. Наприклад, ТЕС на бурому вугіллі. Одержуване паливо ефективно застосовується в печах цементної промисловості [88].

В нашій роботі найбільшу увагу приділено процесу спалювання, як найефективнішої технології з точки зору зменшення об'ємів побутових відходів. Технологія термічної переробки відходів, що має тривалу історію застосування, використовується для зменшення об'єму та рекуперації енергії з оброблених відходів. У цьому процесі, ресурси, що надходять на установки для інцинерації, спалюються в спеціалізованих печах для генерації теплової енергії або пари, яка подальше використовується для виробництва електроенергії. В результаті спалювання утворюється негорючий залишок, який перетворюється на золу. Проте, цей метод має істотні недоліки, такі як високі капіталовкладення та експлуатаційні витрати, а також викиди під час спалювання, що негативно впливають на довкілля та здоров'я людини.

По всьому світу функціонують різноманітні заводи з термічної переробки побутових відходів, одним з яких є визначне швейцарське підприємство в Лозанні. Вважається одним з піонерів у цій сфері, цей завод був розроблений та побудований компанією Hitachi Zosen Inova та запущений у 1958 році, що робить його найстарішим діючим сміттєспалювальним заводом у світі. У 2006 році завод пройшов значну модернізацію, перетворившись на більш великий та ефективніший об'єкт [89].

На рисунку 2.9 представлена схема оновленого заводу, включаючи дві камери згоряння, кожна з яких оснащена інноваційними решітками для спалювання від Hitachi Zosen Inova.



- | | |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Дільниця розвантаження перекиданням | 16. Електростатичний пиловловлювач |
| 2. Котлован з відходами | 17. Зовнішній економайзер |
| 3. Кран для завантаження відходів до печі | 18. Газ/газ теплообмінник 1 |
| 4. Завантажувальний ковш | 19. Скрубер з водяним зрошенням для вловлювання золи |
| 5. Пристрій поршневої подачі | 20. Газ/газ теплообмінник 2 |
| 6. Решітка спалювання Hitachi Zosen Inova | 21. Каталітичний нейтралізатор відпрацьованих газів з селективним каталітичним реагентом |
| 7. Конвеєр зола-шлакових відходів | 22. Витяжний вентилятор штучної тяги димових газів |
| 8. Стрічковий конвеєрний транспортер зола-шлакових відходів | 23. Шумопоглинач |
| 9. Пристрій впуску (забору) первинного повітря для процесу спалювання | 24. Димова труба |
| 10. Вентилятор первинного повітря | 25. Блок золовидалення з нагрівальною поверхні |
| 11. Трубопровідна система подачі та розподілу первинного повітря | 26. Змивання закисленої золи |
| 12. Вентилятор для вторинного повітря | 27. Збірний резервуар води зі скрубера |
| 13. Вентилятор для рециркуляції повітря | 28. Підготовка вапнового молока |
| 14. Вдув (інжекція) вторинного повітря | 29. Збереження фільтрату з цинком |
| 15. Чотирьох-прохідний бойлер (котел) | |

Рисунок 2.9 – Схема оновленого заводу від Hitachi Zosen Inova [89].

Ця модернізація була здійснена для відповідності вимогам Tridel SA, що включали зниження рівня викидів, підвищення ефективності енерговиробництва, економічність експлуатації та високу продуктивність. Завдяки багаторічному досвіду роботи з попереднім заводом зі спалювання побутових відходів, було розроблено та реалізовано удосконалений технологічний процес.

Як можна побачити із вище наведеної технології досить складна і потребує великих капіталовкладень. Тому у нашій роботі розроблена удосконалена технологія термічної переробки побутових відходів.

2.2 Характеристика зони досліджень

Комунальне підприємство "Полігон ТПВ" у місті Івано-Франківськ, Україна, виконує важливі функції у сфері управління побутовими відходами. Це підприємство було створено для прийому та захоронення побутових відходів від населення Івано-Франківської територіальної громади (рис. 2.10) Окрім цього, підприємство також займається поводженням з безпритульними тваринами, включаючи їх вилов, стерилізацію, тимчасове утримання та прилаштування.



Рисунок 2.10 – Вид КП «Полігон ТПВ» с. Рибне із супутника

Основні напрямки діяльності КП "Полігон ТПВ" охоплюють захоронення побутових відходів та експлуатацію полігону для цих цілей. Полігон експлуатується з 1992 року. Підприємство активно займається сучасними методами обробки та переробки відходів, щоб забезпечити

ефективне та екологічно безпечне управління міськими відходами [90]. Підприємство проводить публічні закупівлі, які включають поточний ремонт під'їзної дороги до полігону, придбання обладнання та інших необхідних матеріалів та послуг для своєї діяльності. Це свідчить про їх зобов'язання підтримувати інфраструктуру полігону та вдосконалювати процеси управління відходами [91].

Комунальне підприємство "Полігон ТПВ" у місті Івано-Франківськ займається захороненням побутових відходів. Станом на 2015 рік, на міському полігоні у Рибному було захоронено близько 8 мільйонів кубічних метрів побутових відходів. Повідомлялося, що потужності полігону стрімко вичерпувалися, і до 2025 року вони могли бути повністю використані.

Динаміку накопичення та процес захоронення відходів можна спостерігати за допомогою супутникових знімків зроблених у різні часові періоди функціонування «Полігону ТПВ» (рис. 2.11)

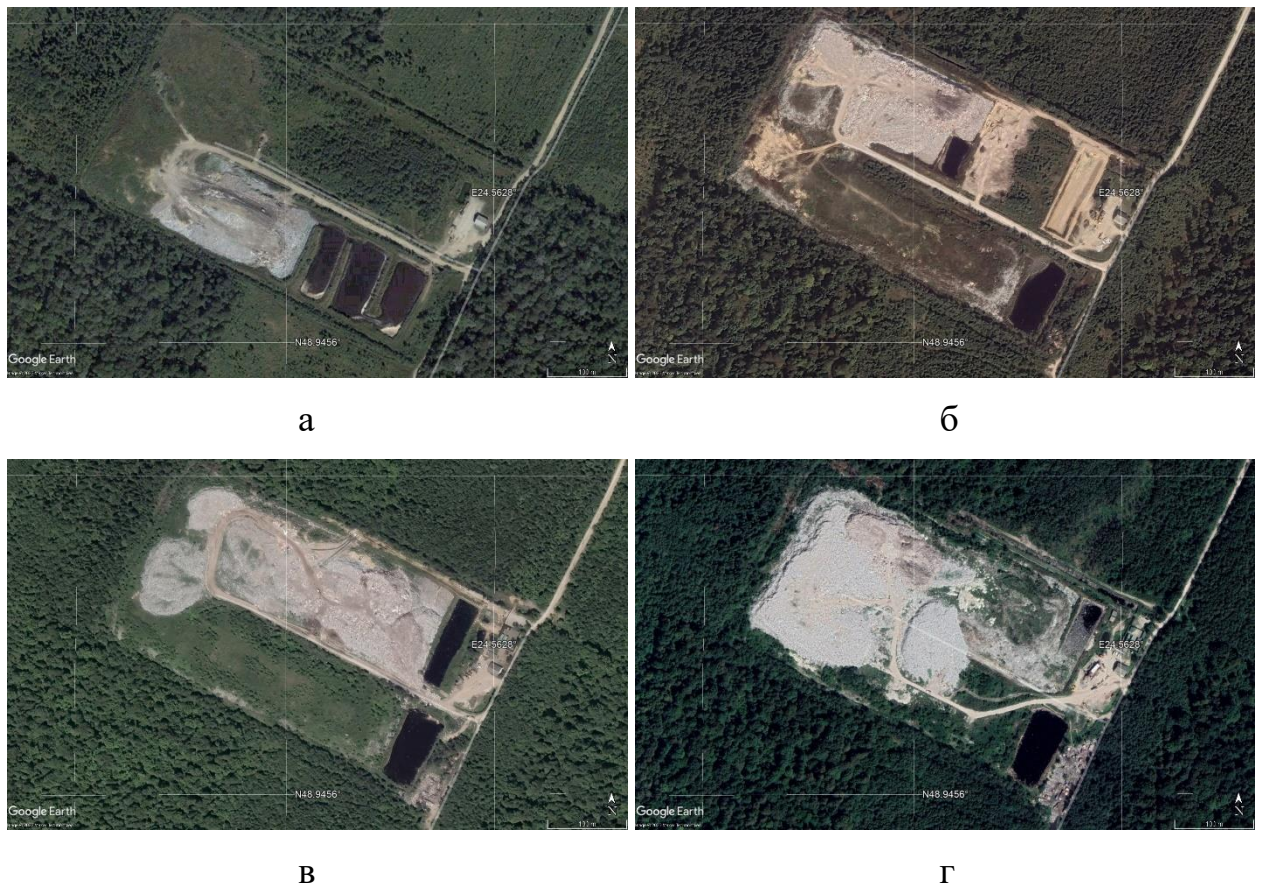


Рисунок 2.11 – Динаміка зміни кількості захоронених відходів
(а – 2004р., б – 2011р., в – 2017р., г – 2022р.)

В останні роки на полігоні були запуснені сортувальна лінія, біогазова установка та фільтратопровід. Площа полігону складає близько 13 гектарів. У 2020 році КП "Полігон ТПВ" призупинило прийом побутових відходів від громад через перенавантаження. Це стало серйозною проблемою для багатьох громад на Прикарпатті, які залежали від цього полігону для захоронення своїх відходів.

У травні 2022 р. на території «Полігону ТПВ» сталася пожежа. Площа займання склала 200 м² (рис. 2.12). Схожа за масштабом пожежа сталася у 2019 р [92].



Рисунок 2.12 – Пожежа на полігоні побутових відходів КП «Полігон ТПВ»

Згідно з планами на той час, одним зі шляхів розв'язання проблеми було об'єднання громад для розробки регіонального плану управління відходами до 2030 року, а також розширення площі полігону.

Для визначення типів побутових відходів, що може бути використана для відновлення енергії, важливим є аналіз морфологічного складу цих

відходів. В багатьох сміттєзвалищах регіону відсутні дані про морфологічний склад побутових відходів, тому було проведено дослідження на найбільшому діючому полігоні в області, що розташований у селі Рибне неподалік Івано-Франківська. Полігон до 2021 року, служив місцем для захоронення відходів з Івано-Франківська, а також з Тисменицького, Надвірнянського, Косівського та Коломийського районів. На разі за офіційними даними комунальне підприємство «Полігон ТПВ» приймає відходи тільки з Івано-Франківської територіальної громади.

Вивчення властивостей побутових відходів є ключовим для оцінки їх енергетичного потенціалу. Проби відходів були зібрані на території полігону побутових відходів КП «Полігон ТПВ». Одним із найважливіших показників, що безпосередньо впливатиме на подальше дослідження – це відсотковий склад побутових відходів захороненого на полігоні. (рис. 2.13) [93].

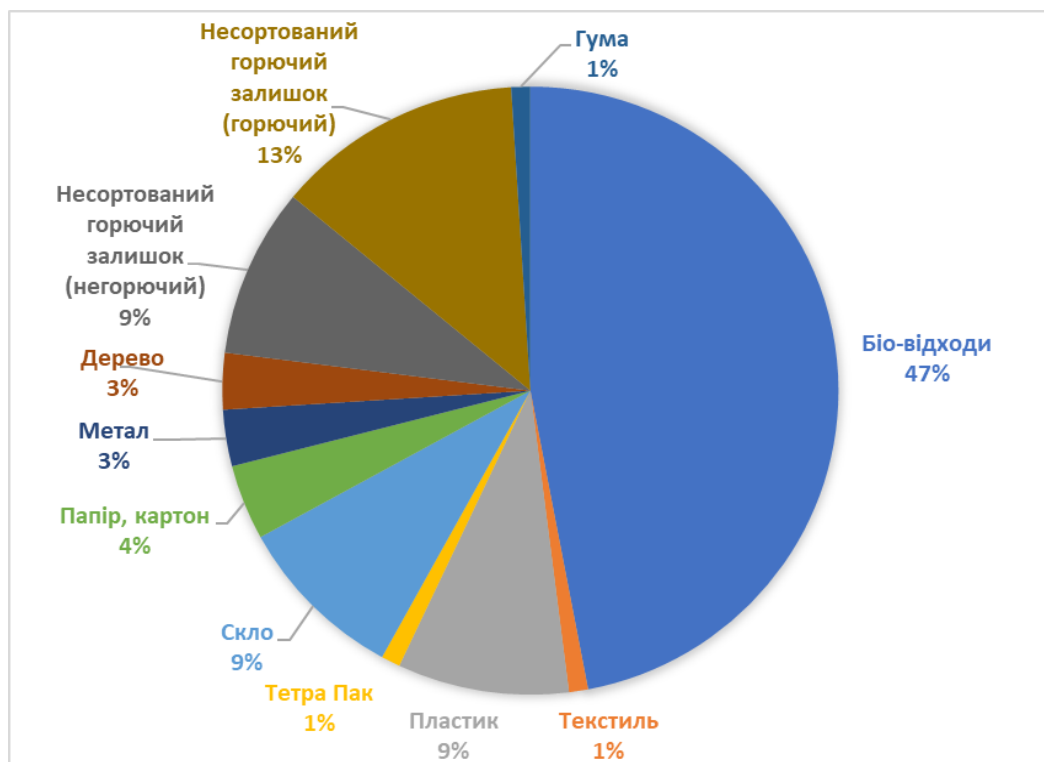


Рисунок 2.13 – Загальний склад побутових відходів полігону с. КП «Полігон ТПВ»

Оцінку морфологічного складу побутових відходів проведено на основі усереднених даних показників відходів за 2020 – 2021рр., які надані КП

«Полігон ТПВ» і одержані згідно Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу побутових відходів, затверджених наказом Міністерства з питань житловокомунального господарства України від 16.02.2010 № 39 [94].

Встановлено орієнтовний відсоток побутових відходів, придатних для відновлення енергії від загальної маси ТПВ, що надходять на полігони складає діапазон від 64-68%. Близько 32% побутових відходів непридатні для одержання енергії - це несортований залишок (негорючий), скло, метал, які при подальших лабораторних дослідженнях та обчисленні енергетичного потенціалу побутових відходів не враховуються. (рис. 2.14)

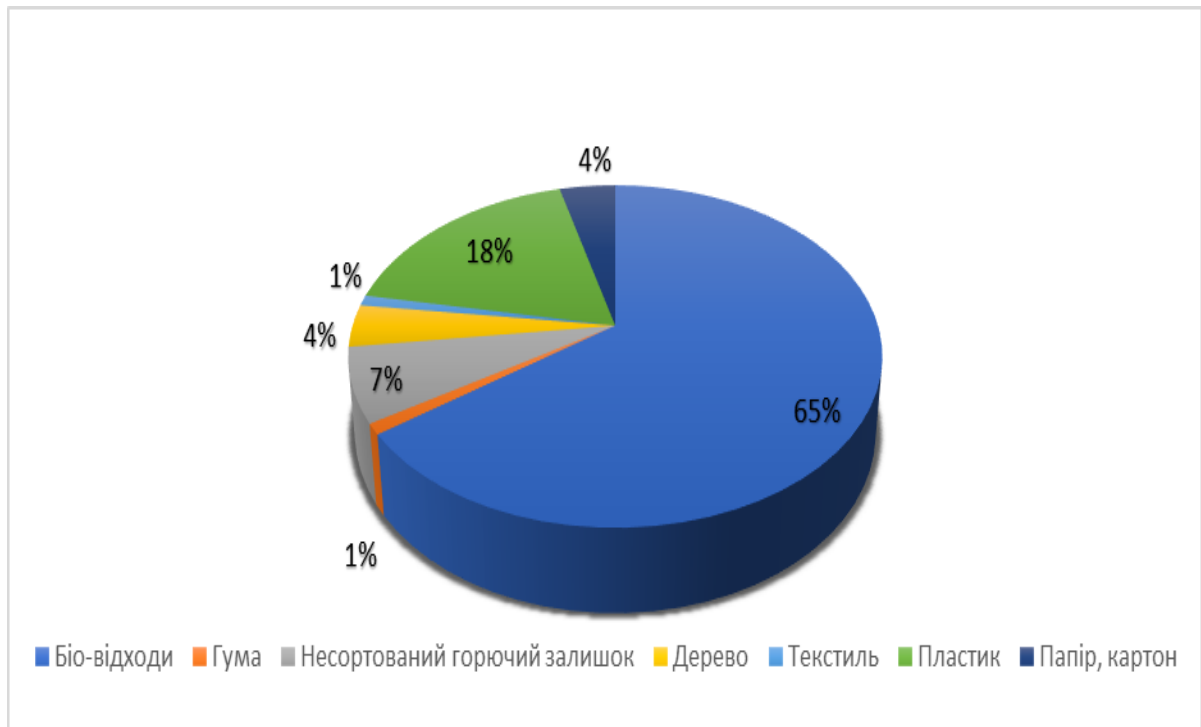


Рисунок 2.14 – Морфологічний склад побутових відходів КП «Полігон ТПВ», що придатне для спалювання

Необхідно враховувати те, що склад побутових відходів змінюється протягом року та залежно від місцевості. На рисунку 2.7 наведено відсотковий склад побутових відходів, що придатні для відновлення енергії в загальній масі відходів.

2.3 Характеристика енергетичних культур, як сировини для паливних гранул

Енергетичні культури, що використовуються як сировина для виробництва паливних гранул, відіграють ключову роль у розвитку біоенергетики. Ці культури, включно з швидкорослими деревами, такими як верба та тополя, а також травами, як міскантус, свічграс, топінамбур сильфія вирощуються спеціально для енергетичного використання завдяки їх здатності швидко накопичувати біомасу. Виробництво паливних гранул з таких культур відзначається рядом переваг, серед яких висока енергетична щільність, зручність транспортування та зберігання, а також здатність зменшити викиди парникових газів у порівнянні з традиційними видами палива.

У рамках нашого дослідження ми зосередили увагу на вивченні потенціалу чотирьох енергетичних культур: сильфії, міскантуса, топінамбура та свічграсу, які були обрані через їхню високу адаптивність до різних умов вирощування та високий енергетичний потенціал. Експериментальна ділянка, де проводилося вирощування, була спеціально підготовлена для цих цілей, щоб забезпечити оптимальні умови для кожної з культур.

У ході нашого дослідження ми зосередили увагу на вивченні впливу осаду стічних вод (ОСВ), поєднаного з компенсаційною дозою мінеральних добрив, на продуктивність обраних трав'янистих енергетичних культур, таких як сильфія, міскантус, топінамбур та свічграс (рис. 2.15). Цей підхід дозволив нам не тільки використати переваги органічного добрива, яке міститься в ОСВ, але й оптимізувати живлення рослин за допомогою мінеральних компонентів.

На основі наших досліджень можна стверджувати, що використання осаду стічних вод у поєднанні з мінеральними добривами значно підвищує продуктивність таких енергетичних культур, як топінамбур, сильфія, міскантус та свічграс, зі зростанням зеленої маси на 57-64%. Цей підхід дозволяє не тільки ефективно переробляти відходи водоочистки, але й значно підвищити врожайність культур, що використовуються для отримання палива.

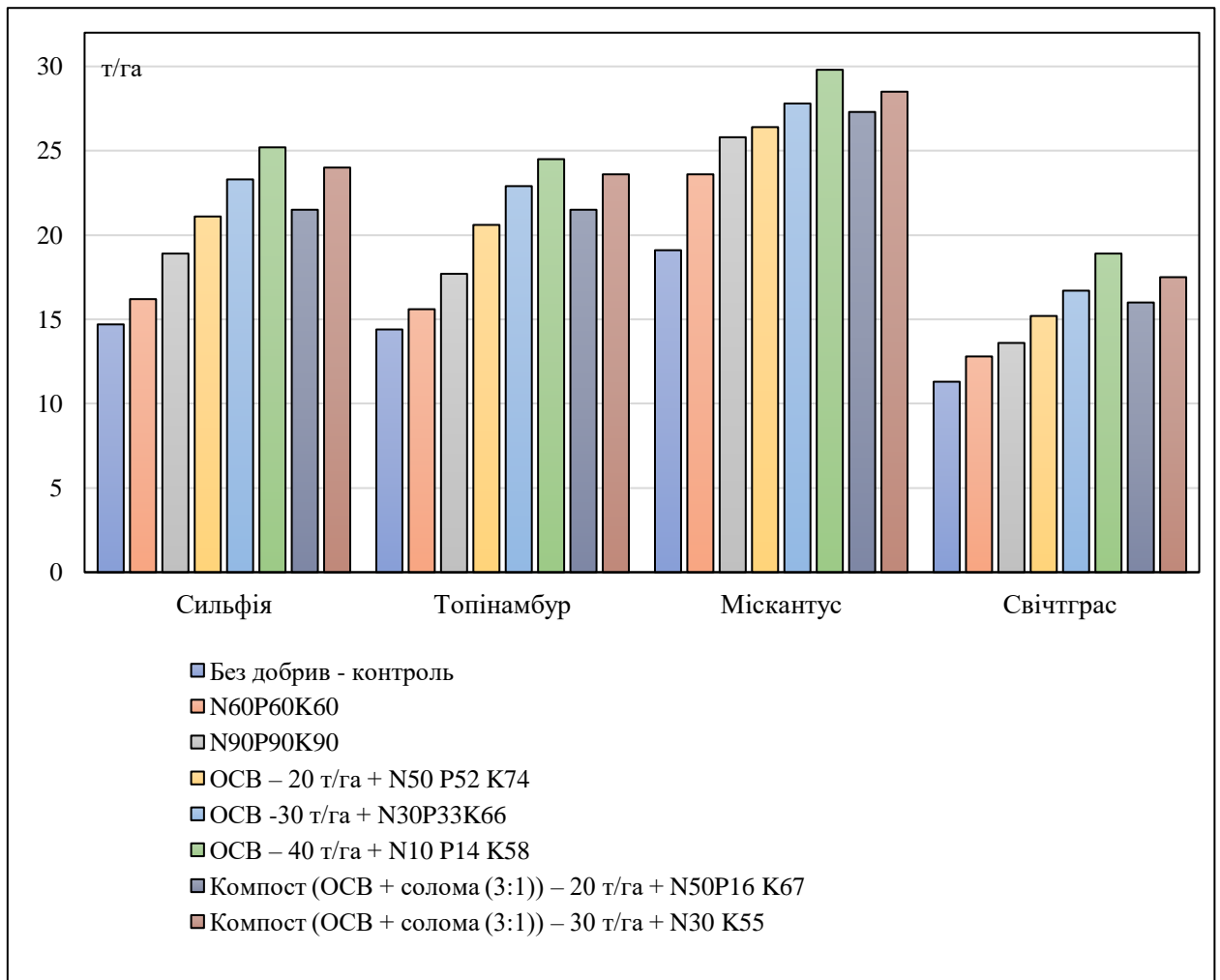


Рисунок 2.15 – Продуктивність енергетичних культур т/га сухої речовини

Після успішного встановлення залежностей між внесенням осаду стічних вод з компенсаційною дозою мінеральних добрив і продуктивністю трав'янистих енергетичних культур, наступним кроком нашого дослідження стала підготовка дослідних зразків для аналізу їх калорійності. Цей етап має вирішальне значення, адже калорійність біомаси є ключовим показником, який визначає її ефективність як джерела теплової енергії. Підготовка зразків включала декілька ключових етапів, таких як збір біомаси з дослідних ділянок, її стандартизація та нормалізація для аналізу (рис. 2.16). Зразки біомаси, отримані з культур топінамбура, сильфії пронизанолистої, міскантуса та світчграсу, були належно висушені для досягнення стандартної вологості, що є важливим для точного вимірювання калорійності.



Рисунок 2.16 – Підготовка дослідних зразків до етапу сушки та подальшого аналізу

Після завершення процесу сушки, що є важливим для досягнення стандартної вологості біомаси, наступним кроком нашого дослідження стало подрібнення дослідних зразків сільфії, міскантусу, топінамбуру та світчграсу. Для цього ми використали лабораторний подрібнювач (рис. 2.17 а), який дозволив нам перетворити зразки на дрібнодисперсну масу (рис. 2.17 б). Цей етап був необхідним для забезпечення однорідності матеріалу та підвищення точності наступних вимірювань калорійності. Подрібнена біомаса кожної культури була далі використана для формування паливних таблеток (рис. 2.17 в). Процес пресування дозволив нам створити стандартизовані зразки, які могли бути ефективно використані в калориметричних дослідженнях.



Рисунок 2.17 – Підготовка дослідних зразків для вимірювань калорійності

Після проведення етапу вимірювання калорійності дослідних зразків сільфії, міскантусу, топінамбуру та світчграсу, було виявлено, що зразки топінамбуру мають найвищу енергетичну цінність серед вивчених енергетичних культур. Даний факт мав значний вплив на подальший напрямок наших досліджень, оскільки висока калорійність топінамбуру вказує на його великий потенціал як ефективного джерела біоенергії.

Враховуючи ці результати, було вирішено зосередити подальші зусилля виключно на дослідженні фізико-хімічних параметрів топінамбуру, відійшовши від аналізу інших культур.

2.4 Методологія виконання досліджень рівня калорійності побутових відходів та пелет

Для визначення рівня калорійності побутових відходів та пелет нами був використаний класичним ізопериболічним метод за формулою Реньо-Пфаундлера та прилад, що працює за даним методом. ІКА С1 калориметр - це високоточний прилад для визначення теплотворної здатності твердих і рідких матеріалів. Він використовується в різних галузях, включаючи наукові дослідження та промислове виробництво. Основна функція калориметра - вимірювання кількості тепла, що виділяється або поглинається під час хімічних реакцій, зокрема при горінні. Важливою особливістю є його здатність працювати з різними типами зразків, включаючи вибухонебезпечні та легкозаймисті матеріали, що робить його надзвичайно корисним у багатьох дослідницьких та промислових застосуваннях. Також він відповідає різним міжнародним стандартам, що забезпечує його універсальність і надійність вимірювань [95].

Зі спеціально підібраних і підготовлених зразків побутових відходів та деревних пелет було створено паливні таблетки за допомогою пресувального пристрою. Додатково, було виготовлено зразок паливної суміші, склад якої було визначено на основі відсоткового вмісту побутових відходів, придатного

для відновлення енергії, згідно з даними, представленими на рисунку 2.14. Вага кожної таблетки дорівнювала $1 \text{ г} \pm 0,05 \text{ г}$, і було вироблено по три таблетки для кожного типу відходів або пелет для зменшення похибки вимірювань. Підготовка зразків включала в себе (рис. 2.18): (а) – підготовка суміші, (б) – підготовка тигля та камери вимірювання, (в) – проведення вимірювань теплової енергії калориметром ІКА С1.

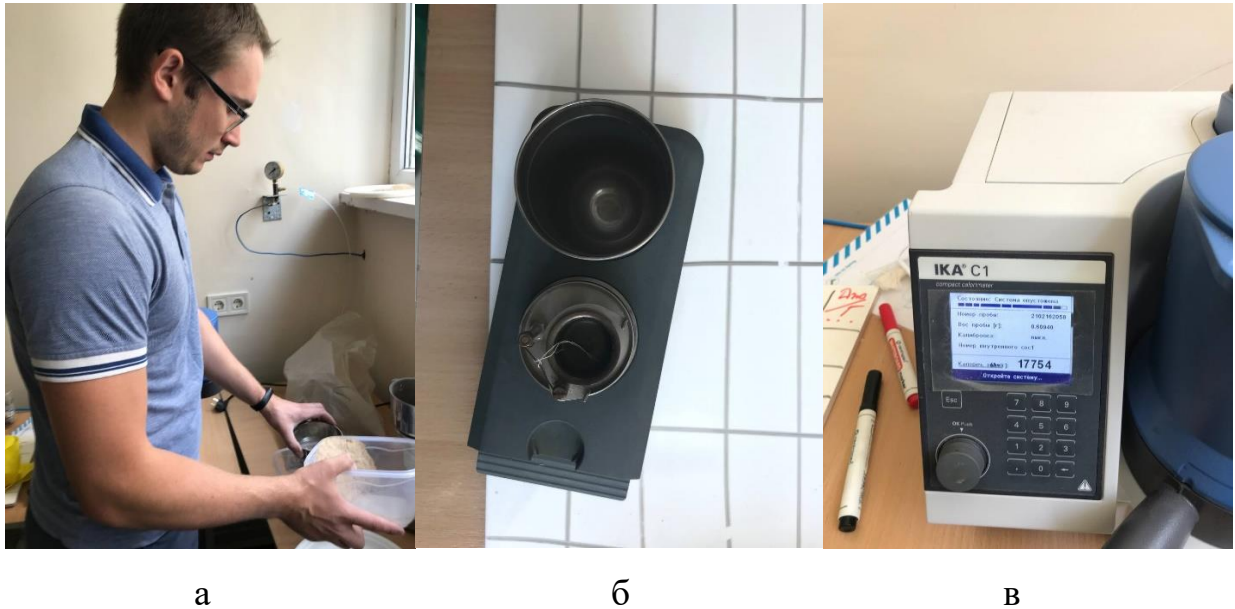


Рисунок 2.18 – Підготовка зразків побутових відходів і пелет для визначення калорійності

Використовуючи калориметр ІКА С1, була виміряна теплотворна здатність кожного зразка деревних пелет та середнього значення їх суміші, представлена в таблиці 2.1. Також були визначені калорійні показники різних видів відходів, а також суміші побутових відходів, склад яких був обраний з урахуванням їх придатності для горіння, зі зразків, взятих з КП «Полігон ТПВ». За допомогою калориметра ІКА С1 було встановлено калорійність для кожного із зразків твердопаливних деревних пелет та їх усередненої суміші (табл. 2.6), та різних типів відходів, а також суміші побутових відходів відповідно до морфологічного складу придатного для спалювання, полігону с. Рибне, (далі суміш відходів Рибненського полігону).

Таблиця 2.6 – Рівень калорійності твердопаливних деревних пелет

Вид палива	Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%	Хвоя-50% Бук-30% Дуб 20%	Топінамбур	Бук	Хвоя (1)	Хвоя (2)	Дуб	Усереднена суміш пелет
Середня маса проби (г)	1 г. ± 0,05							
Калорійність (Дж/г)	18597	17943	17586	17936	17754	17908	18315	17866
	18325	17665	17743	17673	17455	17478	18346	17791
	18274	18037	17854	17990	17721	17694	18278	18184
Середня калорійність (Дж/г)	18399	17882	17728	17866	17668		18313	17947,16

Різноманіття відходів призводить до варіацій у їх теплотворних характеристиках, як показано в таблиці 2.7, де калорійність коливається від 9,6 кДж/г до 39,9 кДж/г, в залежності від конкретного типу відходів.

Таблиця 2.7 – Рівень калорійності відходів КП «Полігон ТПВ»

Вид палива	Папір картон	Пластик	Текстиль	Гума	Біовідходи	Несортований горючий залишок	Суміш відходів Рибненського полігону
Середня маса проби (г)	1 г. ± 0,05						
Калорійність (Дж/г)	12467	41234	16732	32169	14375	8964	18579
	14451	38975	18324	33210	13743	9753	18343
	13452	39702	17683	31740	12793	10148	18542
Середня калорійність (Дж/г)	13457	39970	17580	32373	13637	9622	18487,906

Таким чином було, встановлено що твердопаливні пелети характеризуються схожим рівнем теплотворної здатності, а різниці в величинах калорійності у максимальному (Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40% – 18399 Дж/г.) та мінімальному (Хвоя – 17668 Дж/г.) значеннях не є суттєвою. З іншої сторони результати вимірювань рівнів теплотворної здатності побутових відходів вказують на високу розбіжність між максимальною (Пластик – 39970 Дж/г.) та мінімальною (Несортований горючий залишок – 9622 Дж/г.) калорійністю.

2.5 Моніторинг викиду шкідливих речовин у повітря під час спалювання побутових відходів та пелет

Наступним завданням дисертаційного дослідження було встановлено рівнів забруднення атмосферного повітря під час процесу спалювання побутових відходів та пелет.

З цією метою було використано дане приладове забезпечення прилади для моніторингу якості повітря: газоаналізатор ОКСІ 5М та аналізатор якості повітря СЕМ DT-9881. Газоаналізатор ОКСІ 5М був використаний для вимірювання загального рівня шкідливих газів, викинутих у атмосферу під час спалювання, тоді як аналізатор СЕМ DT-9881 вимірював концентрацію твердих частинок у повітрі. Ці інструменти забезпечують комплексне розуміння екологічного впливу процесу спалювання, дозволяючи оцінити викиди як газоподібних, так і твердих забруднюючих речовин.



Рисунок 2.19 – Прилади, що використовувались в процесі дослідження

Процес отримання даних, щодо рівнів шкідливих речовин проводився згідно методики вимірювання викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел викиду. Вимірювання проводились безпосередньо в димовій трубі по центру її діаметру, не менше ніж відстані двох діаметрів від останнього згину за допомогою вимірювального щупу (рис. 2.19).

OKCI 5M - це мобільний газовий аналізатор, розроблений для виконання екологічних та теплотехнічних вимірювань. Він вимірює рівні кисню (O_2), вуглекислого газу (CO_2), чадного газу (CO), а також оксидів азоту (NO , NO_2) і сірки (SO_2) у повітрі та димових газах, а також фіксує температуру продуктів згорання.

Цей прилад використовує оптичний метод вимірювання, де концентрації забруднювачів визначаються на основі рівня поглинання світла спеціалізованими датчиками. OKCI 5M забезпечує точні дані про рівні забруднюючих речовин у повітрі, що є ключовим для оцінки якості атмосферного повітря та розроблення стратегій щодо його захисту.

Цей прилад також має застосування в моніторингу промислових викидів, дозволяючи контролювати рівні забруднювачів у викидах підприємств та аналізувати їхній вплив на довкілля. OKCI 5M також ефективний у лабораторних дослідженнях, де використовується для визначення концентрацій різних забруднювачів у різних середовищах, включаючи повітря і димові гази.

SEM DT-9881 - це компактний прилад для аналізу якості повітря, що забезпечує точні вимірювання концентрації часток загального пилу (TSP), $PM_{2.5}$, PM_{10} , а також вуглекислого газу (CO_2) і формальдегіду ($HCHO$) в атмосфері. Використовуючи метод лазерної агломерації, прилад визначає рівні забруднення за рівнем поглинання світла спеціалізованими датчиками.

Цей аналізатор надає важливі дані про рівні різних забруднювачів у повітрі, що є критичним для оцінки якості атмосферного повітря та розробки стратегій для його захисту. SEM DT-9881 може бути застосований у різноманітних екологічних дослідженнях, зокрема для аналізу повітряних забруднень, димових газів та інших середовищ.

Цей прилад є ефективним і точним інструментом для моніторингу якості повітря, який активно використовується як в Україні, так і в багатьох інших країнах, допомагаючи у відстеженні стану атмосферного повітря та контролі викидів від промислових об'єктів.

2.6 Методологія виконання досліджень рівня зольності та вмісту важких металів в побутових відходах та пелетах

Дослідження вмісту важких металів в золі спалених побутових відходів та твердопаливних пелет проводився на приладі EXPERT 3L (рис. 2.20). Для проведення аналізу проби побутових відходів та пелет були відпалені у муфельній печі при температурі 800 – 830°C до повного перетворення зразків на золу. Відпалювання проводилось в атмосфері повітря 1-3 години

Принцип роботи рентгено-флуоресцентного аналізатора EXPERT 3L базується на методі спектрального аналізу спектрів флюоресценції елементів випромінених при адсорбції високоенергетичного випромінювання.

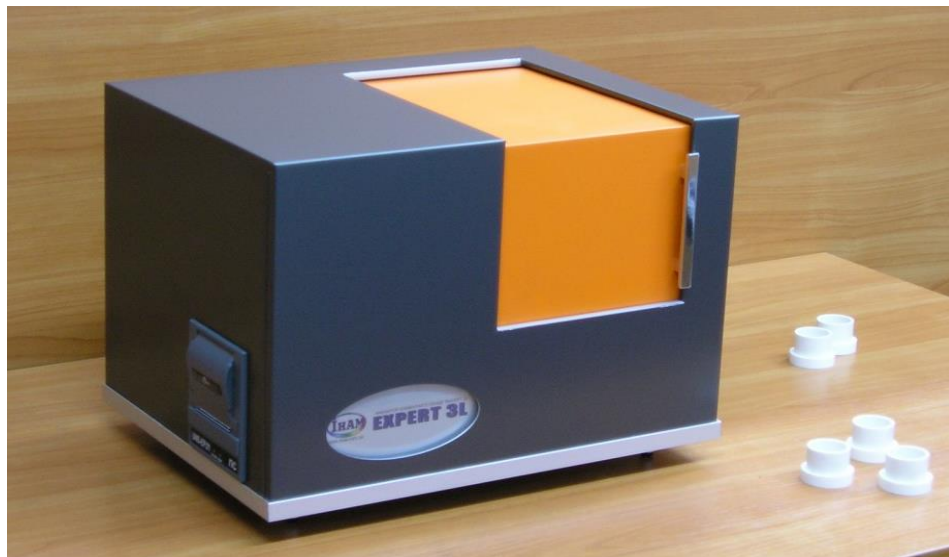


Рисунок 2.20 – Рентгено-флуоресцентного аналізатора EXPERT 3L

У досліджуваному об'єкті атоми активізуються за допомогою рентгенівського іонізаційного випромінювання, на відміну від методів, таких як WDS або EDX, де активація відбувається за рахунок пучка електронів. Коли атоми взаємодіють з високоенергійним випромінюванням, внутрішні електрони збиваються з орбіт, залишаючи місце для електронів з вищих рівнів, які переходять на нижчі, випромінюючи фотони. Це явище створює характерне флуоресцентне світіння, при якому емітоване випромінювання має

меншу енергію, ніж поглинуте. Спектр цієї флуоресценції фіксується за допомогою детектора. (рис. 2.21).

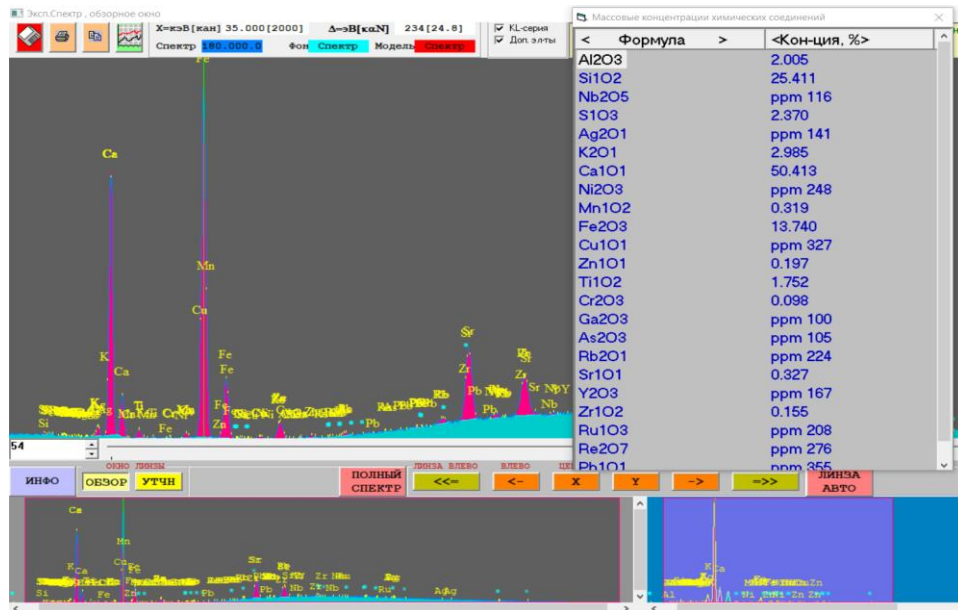


Рисунок 2.21 – Типовий спектр випромінювання для зразка дерев'яної золи отриманий з аналізатора EXPERT 3L

Аналізуючи положення піків максимуму у спектрі випромінювання, можна виконати квалітативний аналіз елементарного складу цього спектра. При цьому за величиною спектрів (використавши еталонні зразки) можна провести кількісний аналіз. Всі дослідження проводяться в атмосфері інертного, хімічно чистого гелію. Точність визначення елементів у рентгенофлуоресцентному аналізаторі складає 1-10ppm.

2.7 Нейронні мережі та штучний інтелект як інструмент обробки та прогнозування даних

Після проведення лабораторних та експериментальних досліджень, за допомогою штучних нейронних мереж ми провели обробку отриманих результатів.

Штучні нейронні мережі (англ. artificial neural network, ANN) представляють собою математичні моделі, що за своєю структурою нагадують

нервову систему людини [96]. Аналогічно до людського мозку, ANN здатні вчитись та узагальнювати знання, що робить їх складовою штучного інтелекту. Ці мережі широко використовуються в різних галузях науки та техніки. Існують різноманітні типи ANN, кожен з яких спрямований на вирішення конкретних завдань.

Загалом, штучна нейронна мережа (ANN) є системою взаємодіючих та з'єднаних процесорів (нейронів). Нейрон, який є основним елементом ANN, представляє собою простий обчислювальний процесор, здатний сприймати, обробляти та передавати інформацію.

При об'єднанні великої кількості нейронів у єдину мережу система може вирішувати складні задачі. Нейрони в ANN групуються у шари (рис. 2.22): вхідний шар, який приймає інформацію; $W_i + W_j$ прихованих шарів, де інформація обробляється; та вихідний шар, який формує результати.

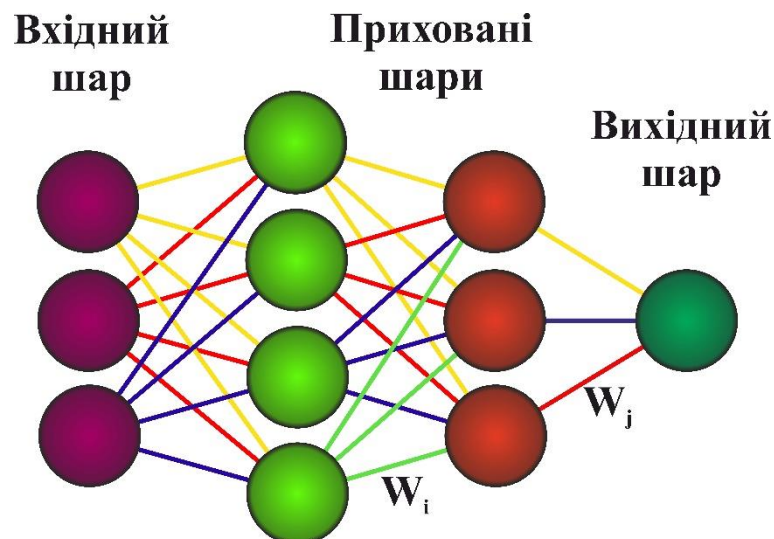


Рисунок 2.22 – Структура штучної нейронної мережі

У процесі функціонування нейрони оперують числами, які зазвичай знаходяться в межах $[0,1]$. або $[-1,1]$.. Кожен нейрон має два параметри: вхідні дані (input data) та вихідні дані (output data). У поле вхідних даних записується загальна інформація з усіх нейронів попереднього шару. Після отримання цих даних інформація нормалізується за допомогою функції активації $f(x)$, (рис. 2.23) після чого вона подається у поле вихідних даних. Важливо відзначити,

що для вхідного шару нейронів вхідна інформація співпадає з вихідною (input = output).

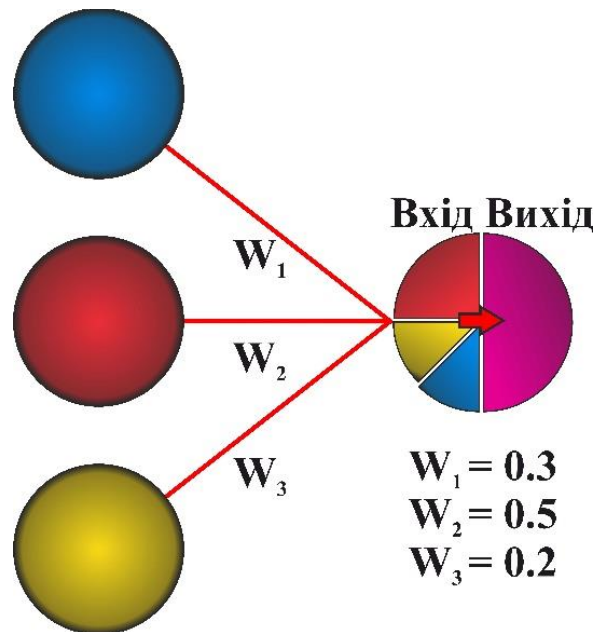


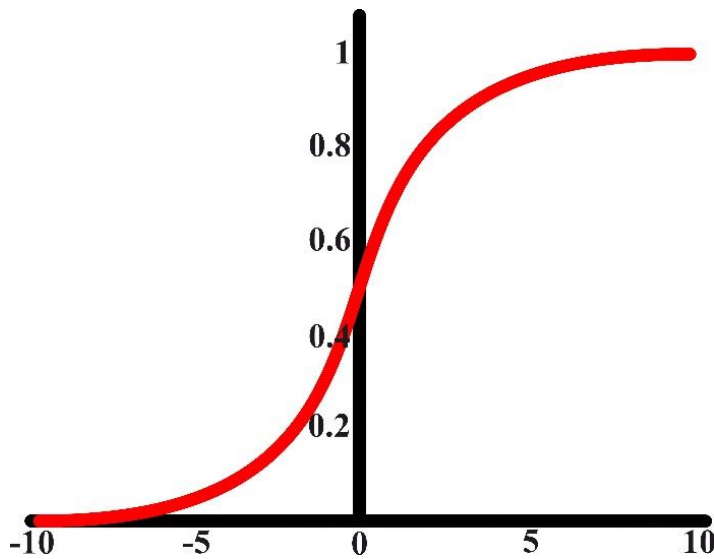
Рисунок 2.23 – Залежність результату обробки даних нейроном від ваги синапсів на прикладі змішування кольорів

Усі нейрони взаємодіють у мережі через синапси (Рис. 00000, W_i , W_j). Синапс представляє собою зв'язок між двома нейронами і характеризується вагою синапсу (вага синапсу). Вага синапсу впливає на зміну вхідної інформації при її передачі від одного нейрона до іншого. На рисунку 2.12 показано, як вага синапсу може змінювати дані, використовуючи приклад кольорів. Під час обробки вхідних даних результат буде сформований з врахуванням синапсу з найбільшою вагою, що визначає його важливість. Сукупність усіх ваг синапсів нейронів дозволяє системі приймати рішення. Кількість нейронів та шарів може значно відрізнятися залежно від складності поставленої задачі [97, 98].

Ще одним важливим компонентом штучної нейронної мережі є функція активації (activation functions) - це функція, яка нормалізує вхідні дані, тобто перетворює дані у числа, що належать діапазону $[0,1]$. [99]. У функції активації для визначення вихідних даних загальна сума вхідних даних та вагових коефіцієнтів порівнюється з певним порогом. Якщо сума перевищує значення

порогу, то елемент обробки генерує сигнал; у протилежному випадку сигнал не генерується (або генерується гальмівний сигнал) [99].

Найчастіше на практиці використовується функція вигляду сигмоїди (рис. 2.24). Важливою рисою сигмоїд є неперервність функцій та їх похідних.



$$f(x)_{act} = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Рисунок 2.24 – Нелінійна функція активації, яка наближує мінімальне та максимальне значення у асимптотах

Для ефективної роботи штучної нейронної мережі (ANN) необхідно провести процес навчання. Зазвичай цей процес включає в себе використання баз даних з відповідними вхідними та вихідними даними.

Таблиця 2.3 – Приклад таблиці з вхідними даними для навчання ANN. Номер по порядку відповідає певному спостереженню. $Data_{ji}$ - дані зафіксовані в конкретному випадку і згруповані по відповідних категоріях.

N	DATA				RESULT
1	$Data_{11}$	$Data_{12}$	...	$Data_{1i}$	$Result_1$
2	$Data_{21}$	$Data_{22}$	...	$Data_{2i}$	$Result_1$
3	$Data_{31}$	$Data_{32}$	...	$Data_{3i}$	$Result_2$
...
J	$Data_{j1}$	$Data_{j2}$	...	$Data_{ji}$	$Result_1$

База даних складається з вже відомих експериментальних даних та зіставлених з ними результатів. Дані можуть бути як числовими, так і нечисловими. У випадку використання нечислових даних, їхню інформацію потрібно організувати за певними категоріями для подальшого використання у процесі навчання ANN.

Таблиця 2.4 – Приклад частини таблиці експериментальних даних які використовувались для навчання ANN.

Тип палива	Variant	CAL	CO	NO	NO _x	NO ₂	SO ₂	SO _x
Пластик	A	40889,65	51	582	462	40	440	440
Гума	B	31838,85	81	762	504	0	640	640
Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%	C	19318,95	20	30	6	37	0	0
Суміш відходів Рибненського полігону	D	18696,34	40	246	234	40	120	235
Бук	E	18074,36	15	48	36	4	0	0
Топінамбур	F	16664,32	23	84	54	250	0	0
Текстиль	G	17289,6	56	342	348	40	440	440
Усереднена суміш пелет	H	17945,69	22	54	24	80	0	0
Хвоя-50% Бук-30% Дуб 20%	I	18418,46	20	42	0	49	33	39
Дуб	J	17214,22	23	54	30	120	0	0
Хвоя (2)	K	18577,65	26	72	18	37	0	0
Дерево	L	17650,87	29	342	450	40	160	160
Хвоя (1)	M	17351,89	25	60	6	93	0	0
Біовідходи	N	14046,11	77	576	540	240	520	520
Папір, картон	O	12966	47	510	438	120	320	320
Несортований горючий залишок	P	9462,909	38	444	510	40	680	680

Як видно з таблиці 2.4 кожен конкретний тип досліджуваного пального відповідає коду категорії (Папір, картон - O) а йому відповідають експериментальні дані (Cal - 12966). Всі дані та категорії заносяться латинськими символами для нормальної роботи програмного пакету.

Основна ідея навчання штучної нейронної мережі полягає у порівнянні вихідних даних з еталонними даними. На початковому етапі навчання ваги розставляються випадковим чином і потім коригуються протягом процесу навчання з метою досягнення відповідності між бажаними та отриманими результатами. (рис. 2.12). Цей процес, в якому відбувається корекція ваг, вимагає значних обчислювальних ресурсів та часу. Для ефективного навчання штучної нейронної мережі необхідно використовувати велику кількість вхідних даних, які містять всю необхідну інформацію про досліджувані групи.

Чим більше вхідних даних використовується, тим точніше може бути прогноз, побудований на базі цих даних штучною нейронною мережею. У результаті побудови нейромережі отримується вихідний код який може бути вбудований у програму яку можна використовувати на персональному комп'ютері.

Висновки до розділу 2

1. Розглянуто основні технології Waste-to-Energy, що дозволяє виявити їхню ефективність у перетворенні побутових відходів на енергію та вторинні ресурси. Застосування сучасних технологій WtE сприяє переходу до більш сталої та ефективної системи управління побутовими відходами, сприяючи енергетичній безпеці та сталому розвитку.

Технології спалювання відходів широко застосовуються в європейських країнах, де вони вважаються одним із ефективних способів переробки побутових відходів та забезпечення виробництва енергії без збільшення негативного впливу на довкілля.

Проведено порівняльну характеристику (SWOT-аналіз) між традиційним спалюванням та інноваційними техніками термічної обробки. Визначено, що найбільш перспективний метод переробки побутових відходів для України є метод піролізу або газифікації.

2. Визначено властивості та морфологічну оцінку складу побутових відходів на «Полігоні ТПВ», що є важливою основою для подальшого вдосконалення систем управління відходами та впровадження ефективних методів їх переробки та рециклінгу. Ретельний аналіз характеристик побутових відходів дозволив визначити потенційні можливості їх переробки та використання, включаючи технології спалювання.

3. Проведено дослідження енергетичних культур, таких як сільфія, міскантус, топінамбур та свічграс. Де в ході дослідження було визначено їхню продуктивність та потенціал як сировини для виробництва паливних гранул.

4. Проведено дослідження за допомогою калориметра ІКА С1 було встановлено калорійність для кожного із зразків твердопаливних деревних

пелет та їх усередненої суміші. Таким чином було, встановлено що твердопаливні пелети характеризуються схожим рівнем теплотворної здатності.

5. Проведено дослідження викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря під час спалювання побутових відходів.

6. Проведено дослідження вмісту важких металів в золі спалених побутових відходів та твердопаливних пелет проводився на приладі EXPERT 3L.

7. Проаналізовано методику штучних нейронних мереж, обробки та прогнозування даних. У рамках даного дослідження штучні нейронні мережі були використані для прогнозування рівня викидів шкідливих речовин під час спалювання побутових відходів та пелет. Для цього було зібрано набір даних, що включав в себе інформацію про морфологічний склад побутових відходів, калорійність палива, а також рівні викидів шкідливих речовин під час спалювання. На основі цього набору даних була навчена штучна нейронна мережа, яка дозволяла прогнозувати рівень викидів для різних комбінацій даних.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ЯК ТВЕРДОГО ПАЛИВА

3.1 Рівень зольності різних видів побутових відходів та твердопаливних пелет

Під час аналізу процесу спалювання використовувались два прилади для моніторингу якості повітря: газоаналізатор ОКСІ 5М та аналізатор якості повітря СЕМ DT-9881. Газоаналізатор ОКСІ 5М був використаний для вимірювання загального рівня шкідливих газів, викинутих у атмосферу під час спалювання, тоді як аналізатор СЕМ DT-9881 вимірював концентрацію твердих частинок у повітрі. Ці інструменти забезпечують комплексне розуміння екологічного впливу процесу спалювання, дозволяючи оцінити викиди як газоподібних, так і твердих забруднюючих речовин.

В рамках дослідження було вивчено рівень зольності різних видів відходів, таких як пластик, біовідходи, гума, папір, текстиль, дерево, а також різних видів твердопаливних деревних пелет (дуб, бук, хвоя тощо). Для цього було розроблено графік, який дозволяє порівняти калорійність різних видів відходів та пелет з рівнем їх зольності.

Для аналізу та обробки даних було використано програмне забезпечення Microsoft Excel. Калорійність відходів була визначена за допомогою калориметра ІКА С1, що дозволило отримати точні значення енергетичної ефективності різних матеріалів. Зольність відходів була визначена методом озолення зразків у муфельній печі, за яким слідувало зважування зразків. Також було проведено дослідження хімічного складу зразків, що додатково дозволило оцінити екологічний вплив спалювання різних видів відходів.

При плануванні процесу спалювання суміші побутових відходів враховуються багато важливих факторів:

Технологія переробки – визначається метод спалювання, який може включати традиційне спалювання або більш складні технології, як-от піроліз

або газифікація. Морфологічний склад відходів, важливо знати, які матеріали містяться в відходах, оскільки різні матеріали мають різну теплотворну здатність і викидають різні кількості шкідливих речовин при спалюванні.

Попередня підготовка відходів, сортування та подрібнення відходів може бути необхідне для підвищення ефективності спалювання та зменшення викидів.

Стан відходів, вологість відходів впливає на процес спалювання, оскільки висока вологість може знижувати теплотворну здатність і ускладнювати процес спалювання.

Фракційний склад: Визначає, які види відходів переважають у суміші, що також впливає на процес спалювання та викиди.

Шлак і зола: Важливо враховувати кількість та склад золи та шлаку, які утворюються під час спалювання, оскільки це впливає на управління післяспалювальними відходами.

Зольність палива: Це критичний показник, оскільки висока зольність може вказувати на більшу кількість неспалених речовин і, відповідно, на нижчу енергетичну ефективність.

Усі ці фактори важливі для забезпечення ефективного та екологічно безпечного процесу спалювання, з мінімізацією викидів та оптимізацією виробленої енергії.

Було проведено дослідження зольності всіх видів палива, а саме 7 проб побутових відходів по різних їх видах, 7 проб твердопаливних пелет з різних порід дерев та 2 проби сумішей: 1) суміш, що відповідає морфологічному складу побутових відходів полігону с. Рибне, 2) усереднена суміш деревних пелет [99].

Було підготовлено 16 зразків, кожен вагою 5 г, відповідно до компонентного складу, представленого в таблиці 3.1. Також була створена додаткова група експериментальних проб.

Таблиця 3.1 – Опис досліджуваних компонентів побутових відходів і пелет у зразках

<i>Види пелет</i>	<i>Компоненти побутових відходів</i>	<i>Опис проб побутових відходів</i>
Дуб	Папір та картон	Папір та картон різного розміру та різної щільності не придатний для сортування як сировина через забрудненість
Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%	Пластик	PET – 21,8%; LDPE – 1,85%; LDDE – 1,8%; PP – 3,49%; HDPE – 8,7%; PS – 1,3%; інші невстановлені види пластику – 61,1%
Хвоя-50% Бук-30% Дуб 20%	Дерево	Гілки дерев та тирса різного розміру
Топінамбур	Текстиль	Шматки різноманітних тканин
Хвоя (1)	Гума та шкіра	Взуття, ущільнення тощо
Хвоя (2)	Біовідходи	Суміш органічних решток (фрукти, овочі тощо)
Бук	Несортований горючий залишок	Шматки пінопласту та інший несортований горючий залишок

Проби відходів та твердопаливних пелет були підготовлені для аналізу з метою встановлення зольності та хімічного складу. Для цих досліджень спочатку прожарений тигель, що зберігався у ексікаторі з сушником, важилися на аналітичних вагах високої точності. З аналітичної проби палива відбирали порцію вагою ($5 \pm 0,1$) г. Вага тигля з порцією знову фіксувалася з точністю до 0,0002 г. Різниця між масою порожнього тигля і масою тигля з порцією палива давала точну вагу зразка. Підготовка зразків охоплювала наступні етапи: а) підготовку тигля, б) приготування суміші, в) озолення зразка в муфельній печі. (рис. 3.1).

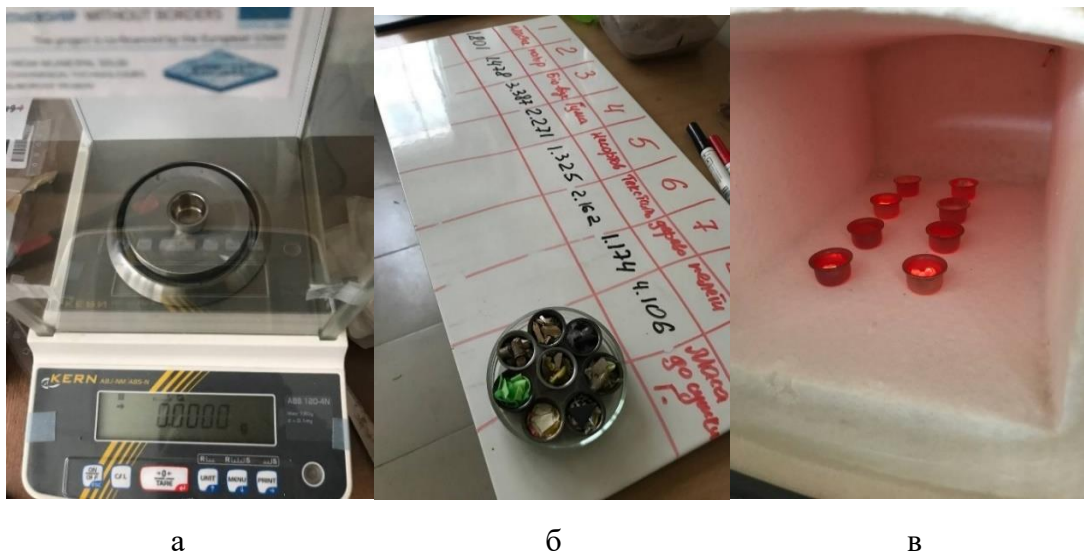


Рисунок 3.1 – Підготовка зразків побутових відходів і пелет для визначення зольності

Прокалювання зразків проводилось в муфельній печі SNOL 8.2/1100 при температурі 810 °С. Зольність досліджуваної проби визначають за формулою.

$$A^a = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100\%$$

де, m_1, m_2, m_3 – маса тигля відповідно прожареного, з наважкою проби палива, із зольним залишком після прожарювання, г.

Після розрахунків отримуємо значення зольності та прирівнюємо їх до калорійності (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Зольність досліджуваних проб

Вид палива	Зольність (%)
Папір, картон	4,83
Пластик	0,61
Текстиль	0,55
Дерево	2,1
Гума	55,1
Біовідходи	33,2
Несортований горючий залишок	23,3
Дуб	1,13
Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%	1,24
Хвоя-50% Бук-30% Дуб 20%	1,21
Топінамбур	0,8
Хвоя (1)	1,27
Хвоя (2)	1,25
Бук	1,03
Усереднена суміш пелет	0,51
Суміш відходів Рибненського полігону	5,89

Аналізуючи графік рівнів зольності для різних видів відходів, можна зробити висновок, що гума має найвищий показник зольності, що становить 55,1%. Це вказує на високий вміст негорючих компонентів у гумі, що може ускладнити її спалювання і збільшити кількість залишкового шлаку (рис. 3.2)

Біовідходи мають другий за величиною показник зольності – 37,8%. Цей високий показник може бути пов'язаний з присутністю мінеральних компонентів у органічних відходах, таких як земля, каміння та інші негорючі матеріали. (рис. 3.2)

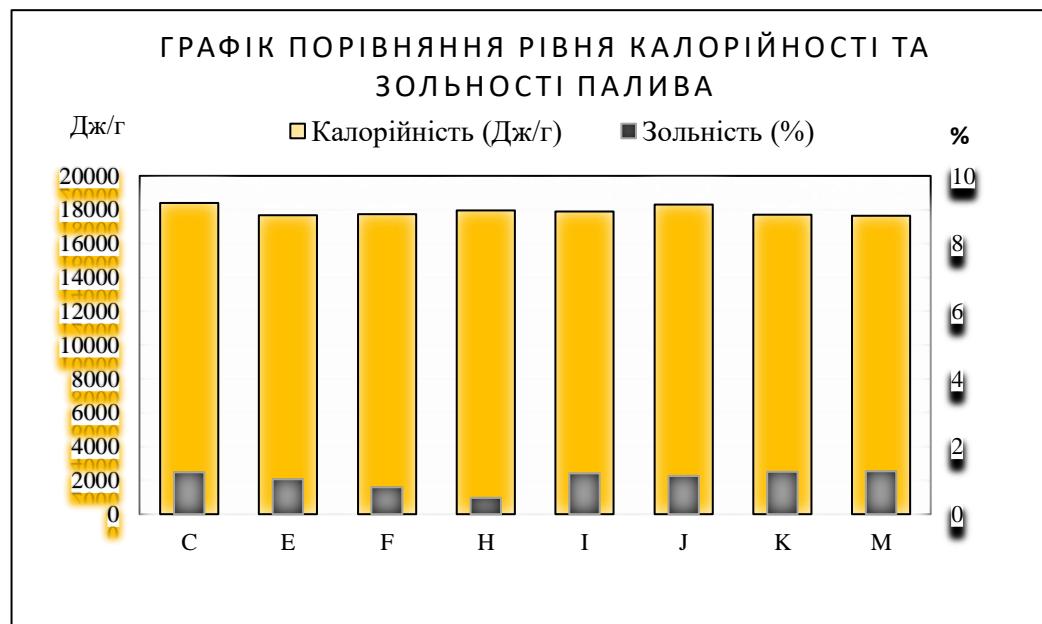
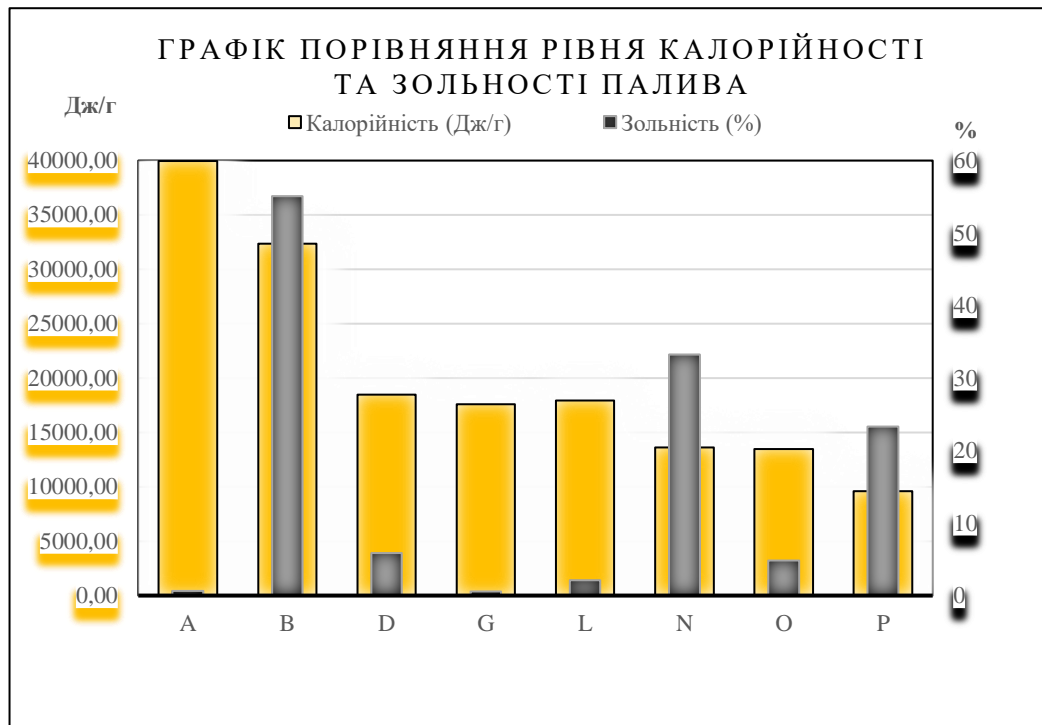


Рисунок 3.2 – Графіки порівняння рівня зольності палива

Несортовані горючі залишки показують третій за величиною показник зольності – 23,3%. Це може бути пов'язано з різноманітністю матеріалів, які входять до їх складу, включаючи папір, пластик, текстиль та інші компоненти, які можуть включати негорючі елементи. Ці дані важливі для розуміння ефективності процесу спалювання та потенційного впливу на довкілля, оскільки висока зольність може збільшувати кількість шлаку та золи, що ускладнює управління відходами після спалювання.

3.2 Хімічний склад золи сортованих та несорттованих побутових відходів

Зразки золи що були отримані після відпалювання сортованих та несорттованих побутових відходів були проаналізовані за допомогою рентгено-флуоресцентного аналізу. Дані отримані під час проведення аналізу на вміст хімічних речовин в золі побутових відходів наведені (табл. 3.3, табл. 3.4) відповідно.

Для аналізу було відібрано 21 зразок – а саме три групи зразків побутових відходів по 7 проб в кожній групі. Після спалювання дані з кожної групи усереднювали для більш точного відображення результату.

У результаті були отримані дані 7 різних сортованих компонентів побутових відходів та несорттований залишок – 1)папір та картон; 2) пластик; 3)дерево; 4)текстиль; 5) гума та шкіра; 6) біовідходи; 7) несорттований горючий залишок.

Також була відібрана суміш відходів Рибненського полігону, що моделює реальні компоненти побутових відходів які можуть бути використані в якості палива.

Основні хімічні речовини та сполуки, які зустрічаються при аналізі даних зразків, а саме токсичні елементи та важкі метали характеризуються малими концентраціями.

Для аналізу було відібрано 21 зразок – а саме три групи зразків побутових відходів по 7 проб в кожній групі. Після спалювання дані з кожної групи усереднювали для більш точного відображення результату. У результаті були отримані дані 7 різних сортованих компонентів побутових відходів та несорттований залишок – 1)папір та картон; 2) пластик; 3)дерево; 4)текстиль; 5) гума та шкіра; 6) біовідходи; 7) несорттований горючий залишок. Також була відібрана суміш відходів Рибненського полігону, що моделює реальні компоненти побутових відходів які можуть бути використані в якості палива.

Таблиця 3.3 – Вміст хімічних елементів в побутових відходах полігону

с. Рибне

Хім елемент	Папір, картон	Пластик	Текстиль	Дерево	Гума	Біовідходи	Несортований горючий залишок	Суміш відходів Рибненського полігону
Ca	25,271	42,148	25,412	20,199	19,254	20,44	26,675	33,099
O	41,785	33,04	35,681	39,013	27,151	34,417	28,824	25,0132
K	4,42	8,326	15,726	9,239	1,978	25,027	24,999	22,8128
Cl	0	2,206	0	2,383	3,451	5,211	5,247	4,8842
Fe	0,997	2,727	3,056	0,797	0,385	0,246	1,779	4,7892
Si	15,79	4,126	7,158	12,687	7,542	1,481	3,569	3,0466
Ni	0,0007	0,00036	0,221	0,0851	1,901	0,00037	0,000457	1,6945
Ti	0,98	3,752	5,01	0,642	3,6472	0,00032	1,079	1,193
S	0,421	0,763	2,1	1,708	10,956	1,852	1,141	0,8942
Al	10,032	1,54	0,704	9,987	8,788	2,628	3,38	0,6234
Zn	0,109	0,127	0,7476	0,121	0,0001	0,1002	0,344	0,6084
Cr	0,123	0,53	0,762	0	8,788	0	0,000457	0,3718
Mg	0,0026	0	0,665	1,564	1,352	2,551	1,061	0,2626
Mn	0,0004	0,059	0,055	0,992	0,956	0,00022	0,056	0,219
Br	0,0001	0,416	0	0,0004	0,0000	0,00030	0,07	0,2128
Cu	0,0002	0,088	0,0003	0,0001	0,468	0,00010	0,054	0,14
Sr	0,0006	0,00013	0	0,0001	0,0002	0,00024	0,000131	0,06089
P	0	0	2,702	0,582	2,841	6,02	1,434	0,0578
Pb	0,065	0,06987	0	0,0001	0,5400	0,02443	0,28562	0,0164
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0,00008
Nb	0	0	0	0	0	0	0	7,62E-
Cd	0	0	0	0	0	0	0	3,94E-
Ga	0,0006	0	0	0	0,0004	0	0	0
Rb	0,0002	0	0	0	0,0001	0,00042	0,00057	0
Zr	0,000124	0	0	0	0,000024	0	0,00019	0
Mo	0	0,00063	0	0	0,00018	0	0,00043	0
Sb	0	0,081	0	0	0,0001	0	0	0
Pd	0	0	0	0	0,0001	0,00016	0,00014	0
I	0	0	0	0	0,0003	0,00022	0	0
Re	0,0009	0	0	0	0	0	0	0
Ir	0,0004	0	0	0	0	0	0	0

Дослідженнями хімічного складу зразків показало, що різні типи побутових відходів мають різний хімічний склад та представлені в основному сумішшю відповідних оксидів.

Основну увагу в дослідженнях приділено суміші відходів Рибненського полігону, так як потенційно саме ця суміш може бути використана в якості твердого палива.

Так, для побутових відходів Рибненського полігону характерним є наявність таких хімічних елементів – Ca, O, Cl, K, Fe, Si. У загальній кількості ці елементи складають 93.6% всієї маси попелу суміші відходів Рибненського полігону (рис. 3.3).

Як видно з графіка всі інші елементи проявляються у значно менших кількостях. Особливої уваги заслуговують Ni, Zn, Cr, Cu, [100].

Дані елементи відносяться до важких металів, і хоча їхня кількість у порівнянні не є великою (Ni-1,69, Zn-0,6, Cr-0,37, Cu-0,14 відсотків), при промисловому спалюванні побутових відходів, їхня кількість буде потенційно небезпечною [101].

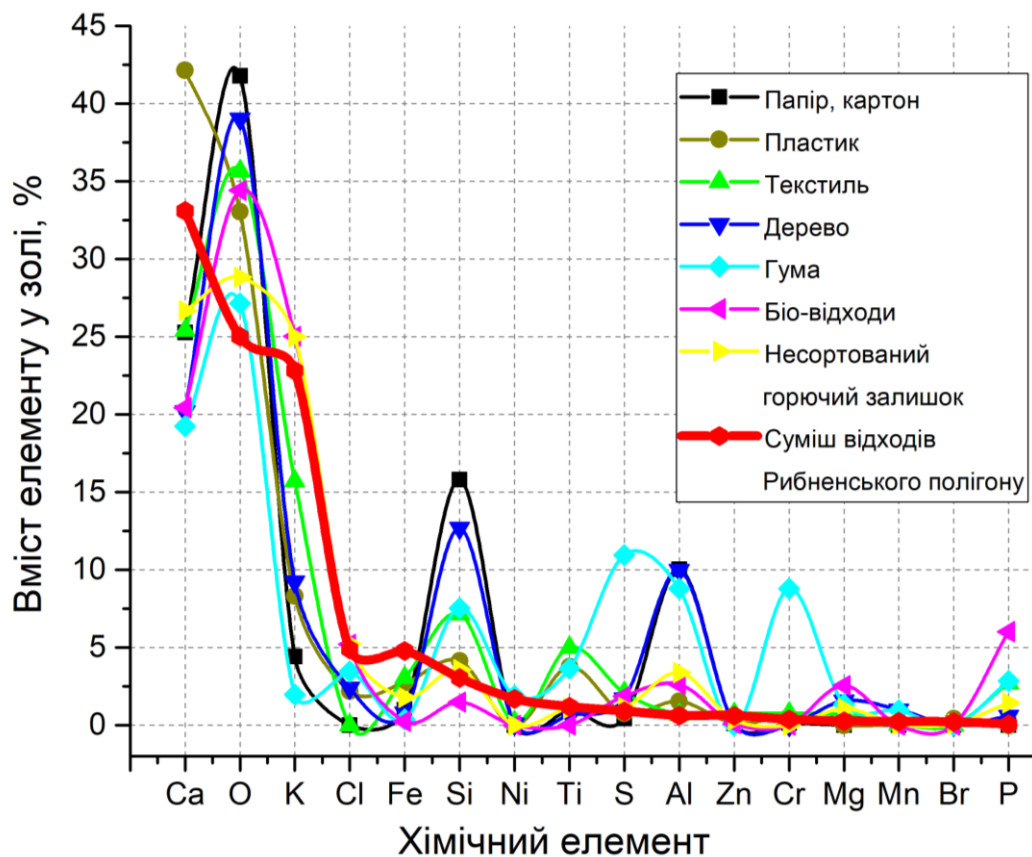


Рисунок 3.3 – Середній хімічний золи різних типів побутових відходів обрахований у відсотках по масі. (Показані хімічні елементи кількості яких більша за 0,05% для суміші побутових відходів Рибненського полігону)

Результати дослідження вмісту хімічних елементів кількість яких у золі ТВП є незначною представлені в (рис.3.4). Вміст окремих елементів у різних видах золи з побутових відходів була дуже різноманітною. Найбільші концентрації вмісту іонів металів, таких як мідь, стронцій та свинець, були зареєстровані у гумі, несортованих відходах та пластику. У суміші побутових відходів Рибненського полігону дані елементи представлені відповідно Cu - 0.141%, Sr- 0.061%, Pb- 0.016%. Також була зафіксована значна кількість Стибію (Sb- 0.081%) у відходах сортового пластику. Це може свідчити про те, що на полігон потрапляє пластикова тара у якій зберігались небезпечні хімічні речовини і відповідно при використанні пластику з даного полігону на це потрібно звертати увагу. Усі інші хімічні елементи (Ag, Nb, Cd, Ga, Rb, Zr, Mo, Sb, Pd, I, Re) представлені у значно менших концентраціях ($0,0001\% <$)

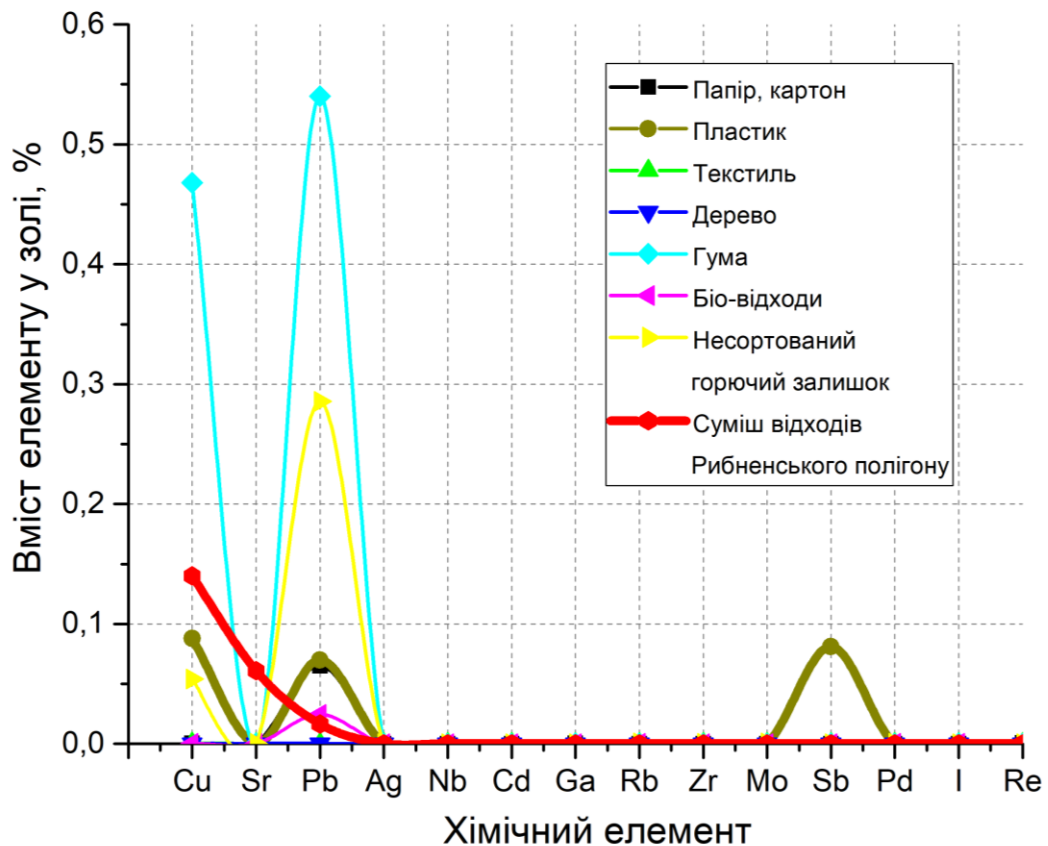


Рисунок 3.4 – Середній хімічний склад золи різних типів побутових відходів обрахований у відсотках по масі. (Показані хімічні елементи кількість яких менша за 0,05% для суміші побутових відходів Рибненського полігону)

Зважаючи на вищесказане, хічний склад попелу різних типів побутових відходів не представляє небезпеку у невеликих кількостях, але при масовому спалюванні таких відходів необхідним є постійний моніторинг. При цьому якщо відходи з полігону будуть використовуватись у якості пального, необхідним є спеціальний метод поводження з відходами золи.

3.3 Хімічний склад золи твердопаливних пелет

Пелети це один з найпопулярніших видів твердого палива, який зараз масово застосовується у всіх видах народного господарства. Цей вид твердого палива отримується компресуванням біомаси, такої як дерево чи сільськогосподарські залишки, в циліндричні гранули.

Пелети відзначаються високою ефективністю згорання та екологічною чистотою, що сприяє їхньому широкому застосуванню як джерела енергії. Саме через свою поширеність пелети були як еталон, та як можливий компонент високоефективної суміші з побутових відходів.

Хоча пелети вважаються екологічно-чистим джерелом енергії, при їх спалюванні також можуть утворюватись токсичні продукти згорання. Саме тому було проведено серію досліджень по аналізу хімічного складу золи пелет з різних видів деревини.

У якості зразків для досліджень були вибрані твердопаливні пелети порівняння виготовлені з різних порід дерев та рослин - 1) дуб; 2) хвоя-30% бук-30% дуб 40%; 3) хвоя-50% бук-30% дуб 20%; 4) топінамбур; 5) хвоя1; 6) Хвоя2; 7) бук.

Дані дослідження включали 21 зразок –три групи зразків пелет по 7 проб в кожній групі. Хімічний аналіз проводився по три дослідження для кожного зразка для усереднення результатів.

Результати дослідження представлені графічно на рисунку 3.5. Як видно з рисунку, вмісту різних хімічних елементів у золі різних видів пелет є досить схожим. Так, основні хімічні елементи які складають 92 відсотки це Са, О, К,

Fe, Si. Це ті ж елементи які в основному присутні у золі побутових відходів. Єдина відмінність у прояві Mn та Cl.

В таблиці 3.4 показані результати хімічного аналізу золи утвореної спалюванням твердопаливних пелет виготовлених з різних видів дерева.

Таблиця 3.4 – Вміст хімічних елементів в твердопаливних пелетах

Хім елемент	Дуб	Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%	Хвоя-50% Бук-30% Дуб 20%	Топінамбур	Хвоя (1)	Хвоя (2)	Бук	Усереднена суміш пелет
Ca	33,964	35,208	36,538	35,825	33,182	37,8	20,043	33,2359
O	30,117	28,911	29,665	26,865	30,677	30,2	35,762	30,3210
K	16,492	18,652	13,801	28,381	13,158	14,6	13,299	16,9240
Fe	4,644	8,01	10,921	1,48	9,809	3,32	10,977	7,0237
Si	2,791	2,753	3,096	2,59	4,234	3,16	13,531	4,5937
Mn	5,588	2,688	3,123	0,224	4,892	7,44	1,643	3,6574
Al	2,025	1,613	1,499	1,606	1,645	1,64	1,884	1,7024
Ti	3,128	0,745	0,669	0,18	1,323	0,42	1,401	1,1244
Zn	0,357	0,569	0,176	0,152	0,632	0,37	0,201	0,3516
S	0,427	0,486	0,212	0,22	0,183	0,20	0,118	0,2650
P	0	0	0	0,52	0	0,44	0,787	0,2499
Cl	0	0	0	1,089	0	0	0	0,1556
Sr	0,123	0,102	0,101	0,196	0,089	0,09	0,08	0,1126
Mg	0	0	0	0,617	0	0	0	0,0881
Cu	0,105	0,081	0,001	0,000185	0,052	0,05	0,001	0,0417
Sn	0	0,069	0,001	0	0	0	0	0,0099
Cr	0	0	0	0	0,068	0	0	0,0097
Ru	0,065	0,01	0	0	0	0	0	0,0093
Ni	0,0004	0,05	0,00	0,000046	0,0002	0	0	0,0079
Zr	0,0004	0	0	0,000073	0	0	0,053	0,0076
Rb	0,0004	0,001	0,01	0,000128	0,001	0	0,0002	0,0003
Pb	0	0	0	0	0	0	0,001	0,0001
Mo	0,001	0	0	0	0	0	0	0,0001
Ag	0	0	0	0,000122	0	0	0	0,00002
Ga	0	0	0	0	0	0	0,001	0,00001

На рисунку 3.5 показані результати хімічного аналізу попелу продуктів твердопаливних пелет. Показані хімічні елементи кількість яких менша за 0,25% по масі. Як видно з графіка спостерігається досить значна відмінність у прояві хімічних речовин у різних продуктах. Так у топінамбурі

спостерігається значна кількість фосфору (0,52%), хлору (1,08%) та магнію (0,61%) у порівнянні з іншими продуктами [102].

Для всіх дослідних зразків є характерно високий прояв стронцію (близько 0.1%) та міді (близько 0.1%). Висока кількість фосфору характерна для бука (0,79%) та для хвої (0,44%). Якщо говорити про наявність важких металів у золі суміші твердопаливних пелет, то спостерігається незначна кількість стронцію та міді. При цьому їхня кількість знаходиться у допустимих межах. Усі інші хімічні елементи представлені у значно менших концентраціях ($0,01\% <$)

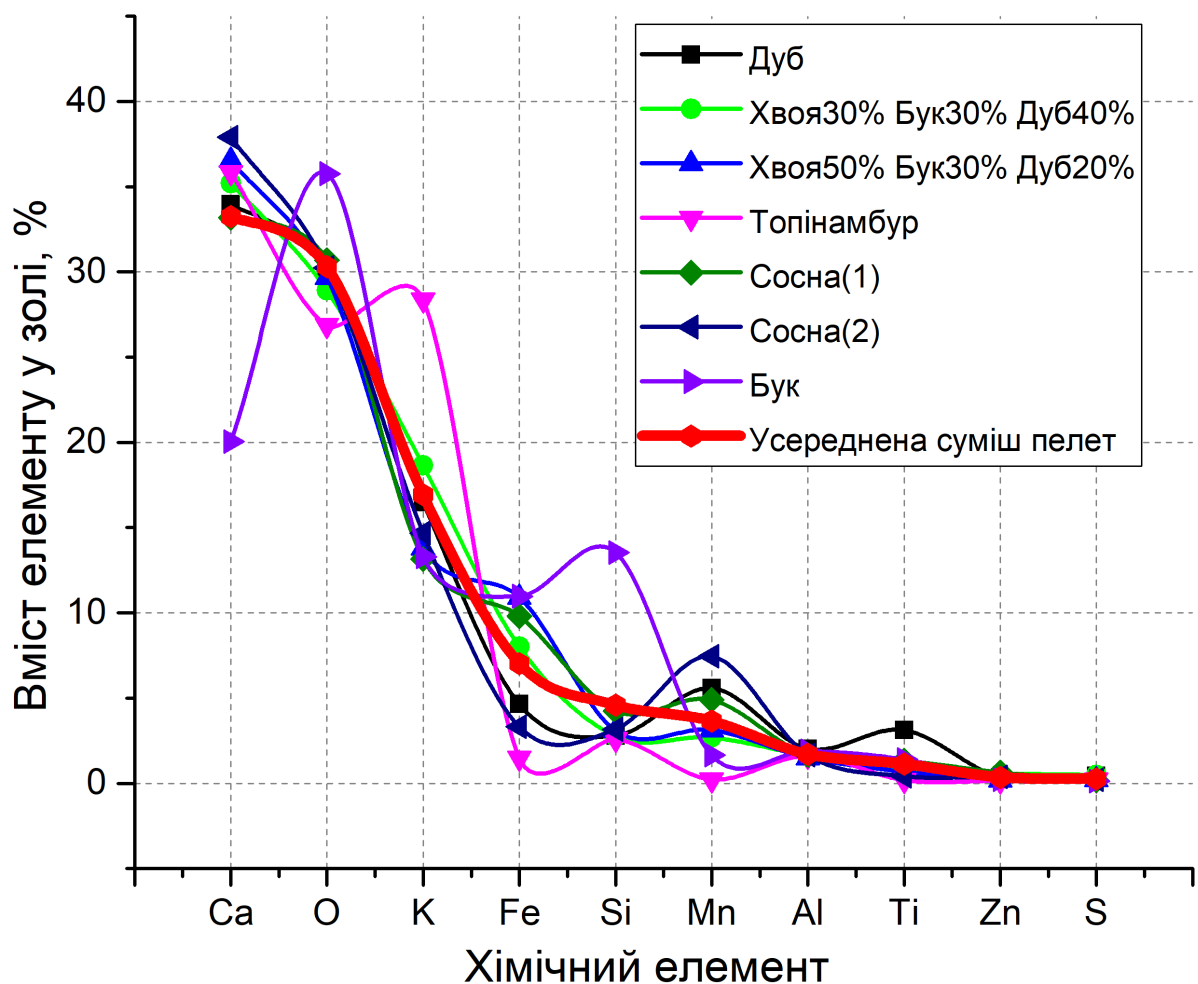


Рисунок 3.5 – Середній хімічний склад попелу різних типів продуктів у твердопаливних пелетах обрахований у відсотках по масі. (Показані хімічні елементи кількість яких більша за 0,25% для суміші твердопаливних пелет)

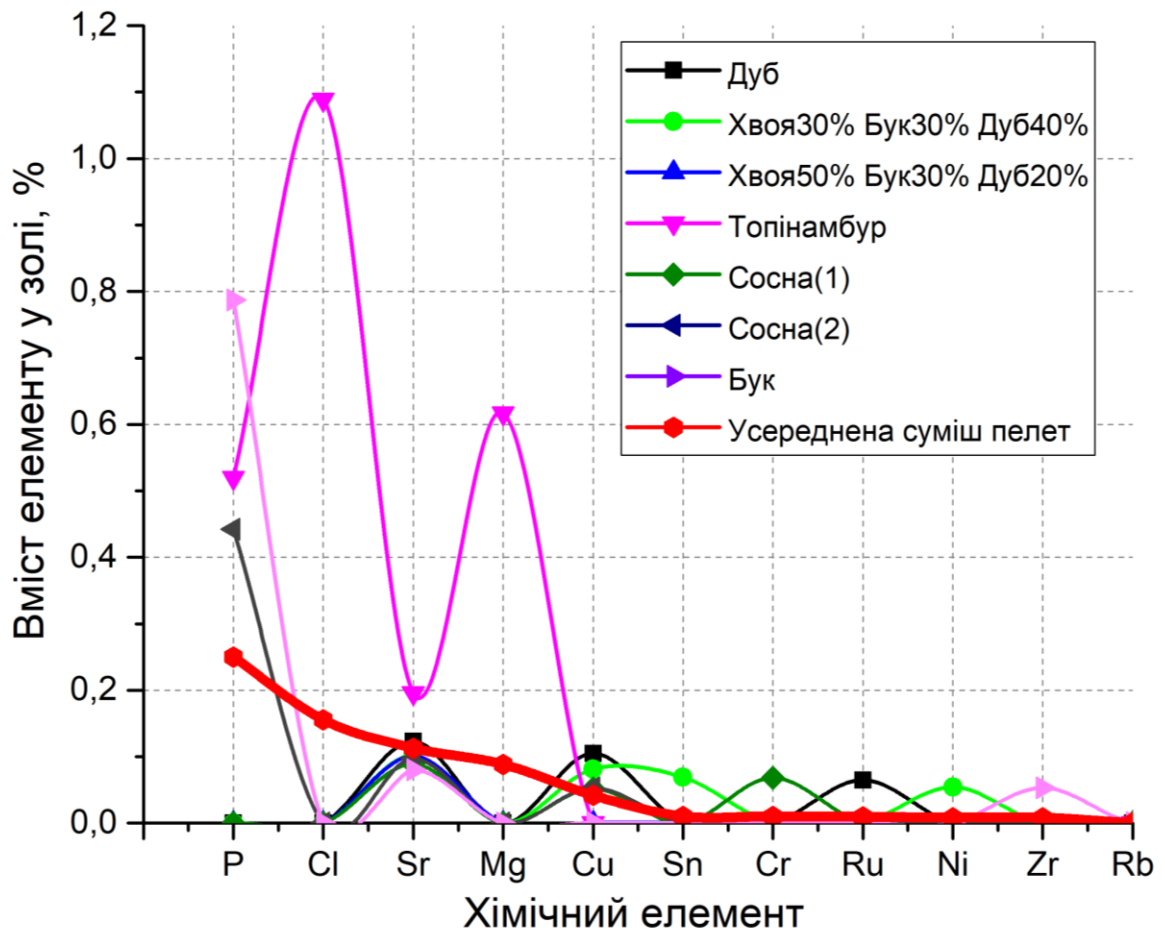


Рисунок 3.6 – Середній хімічний склад попелу різних типів продуктів у твердопаливних пелетах обрахований у відсотках по масі. (Показані хімічні елементи кількість яких менша за 0,25% для суміші твердопаливних пелет)

3.4 Порівняння вмісту важких металів у золі твердопаливних пелет та різних видах сортованих та несортованих побутових відходів

Аналіз зразків побутових відходів виявив, що токсичні елементи та важкі метали присутні в малих концентраціях, які не перевищують допустимі норми. Основні елементи, що викликають занепокоєння у золі побутових відходів, - це цинк (Zn), мідь (Cu), стронцій (Sr), та свинець (Pb). (рис. 3.7, 3,8). Через потенційну небезпеку цих елементів, зола, що утворюється після спалювання побутових відходів, потребує спеціального поводження та переробки, щоб мінімізувати можливий шкідливий вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини.

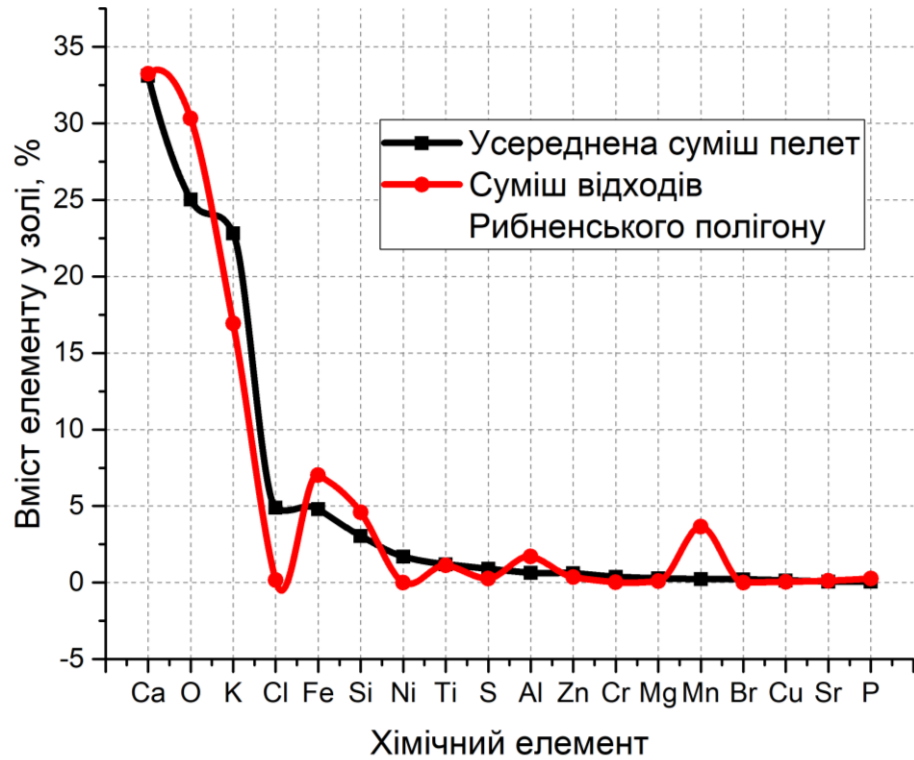


Рисунок 3.7 – Вміст хімічних елементів у золі побутових відходів Рибненського полігону та суміші твердопаливних пелет обрахований у відсотках по масі. (Показані хімічні елементи кількість яких більша за 0,02%)

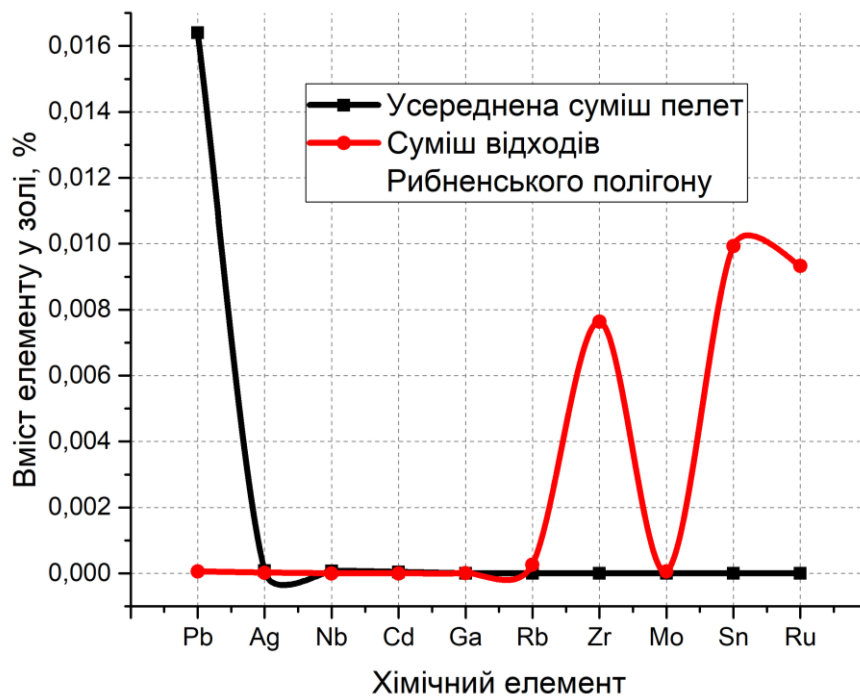


Рисунок 3.8 – Вміст хімічних елементів у золі побутових відходів Рибненського полігону та суміші твердопаливних пелет обрахований у відсотках по масі. (Показані хімічні елементи кількість яких менша за 0,02%)

Порівняння хімічного складу золи твердопаливних пелет та золи суміші побутових відходів показує, що основні елементи, які складають більшу частину маси в обох зразках, є однаковими (Ca, O, K, Cl, Fe, Si), складаючи 92.1% ваги попелу у суміші твердопаливних пелет. Основна відмінність - вищий вміст хлору (Cl) у золі з побутових відходів, що може вказувати на його нерівномірне розподілення в суміші відходів або на особливості його накопичення в певних рослинах [103].

У золі твердопаливних пелет виявлений цинк (Zn) як єдиний представник важких металів, причому в невеликій кількості, становлячи 0,35%. Це свідчить про відносно низьку концентрацію потенційно токсичних важких металів у золі пелет, що робить їх більш безпечними для навколишнього середовища порівняно з іншими видами відходів.

Таблиця 3.5 – Порівняння вмісту важких металів у золі твердопаливних пелет та суміші побутових відходів Рибненського полігону

Хім елемент	Суміш відходів Рибненського полігону	Усереднена суміш пелет	Хім елемент	Суміш відходів Рибненського полігону	Усереднена суміш пелет
Ca	33,099	33,2359	Br	0,2128	0,0000
O	25,0132	30,3210	Cu	0,14	0,0417
K	22,8128	16,9240	Sr	0,060899	0,1126
Cl	4,8842	0,1556	P	0,0578	0,2499
Fe	4,7892	7,0237	Pb	0,0164	0,0001
Si	3,0466	4,5937	Ag	0,000081	0,00002
Ni	1,6945	0,0079	Nb	7,62E-05	0,0000
Ti	1,193	1,1244	Cd	3,94E-05	0,0000
S	0,8942	0,2650	Ga	0	0,00001
Al	0,6234	1,7024	Rb	0	0,0003
Zn	0,6084	0,3516	Zr	0	0,0076
Cr	0,3718	0,0097	Mo	0	0,0001
Mg	0,2626	0,0881	Sn	0	0,0099
Mn	0,219	3,6574	Ru	0	0,0093

Аналіз хімічного складу суміші відходів з Рибненського полігону вказує на наявність різних хімічних елементів, зокрема кальцію (Ca), кисню (O), калію (K), хлору (Cl), заліза (Fe), кремнію (Si), нікелю (Ni), титану (Ti), сірки (S), алюмінію (Al), цинку (Zn), хрому (Cr), магнію (Mg) та марганцю (Mn). Найвищий вміст спостерігається для кальцію, кисню та калію, що може бути характерно для мінеральних компонентів та органічного матеріалу у відходах.

Наявність таких елементів, як нікель, хром і цинк, може вказувати на присутність індустріальних або будівельних відходів. Присутність важких металів потребує уваги, оскільки вони можуть мати негативний вплив на довкілля та здоров'я людини при неналежному управлінні та переробки цих відходів. Такий склад відходів може також впливати на їхню енергетичну цінність та поводження під час спалювання, особливо з точки зору викидів і утворення золи. Підхід до управління такими відходами вимагає ретельного планування та врахування екологічних та здоров'язберігаючих аспектів.

Аналіз хімічного складу усередненої суміші деревних пелет показує наявність різних хімічних елементів, причому найбільші вмісти мають кальцій (Ca), кисень (O), і калій (K). Такий склад може бути характерним для деревини, оскільки кисень та кальцій часто присутні у високих концентраціях у деревній біомасі. Наявність важких металів, таких як нікель (Ni) та хром (Cr), хоча і в дуже низьких концентраціях, вимагає уважності з точки зору впливу на довкілля під час спалювання пелет. Присутність заліза (Fe), силіцію (Si) і алюмінію (Al) може вказувати на домішки інших матеріалів у деревині, або бути частиною природного складу деяких видів дерев.

Високий вміст калію (K) та низький вміст хлору (Cl) є позитивними аспектами для спалювання, оскільки калій може сприяти зниженню температури плавлення золи, а низький вміст хлору знижує ризик корозії та утворення діоксинів. Марганець (Mn) має відносно високий вміст, що може бути пов'язано з певними видами деревини, використаними у суміші пелет.

Загалом, склад деревних пелет є важливим фактором, який впливає на їхні енергетичні характеристики та екологічний вплив при спалюванні. Вміст важких металів, хоч і низький, потребує контролю, щоб забезпечити безпечне використання пелет як джерела енергії. Аналіз хімічного складу суміші відходів з Рибненського полігону показує наявність різних хімічних елементів у досить низьких концентраціях. Серед виявлених елементів:

Бром (Br) має концентрацію 0,2128%, що може бути пов'язано з присутністю пластикових матеріалів або інших хімічно оброблених продуктів.

Мідь (Cu) з концентрацією 0,14% може походити від електронних відходів, проводки або інших металевих компонентів.

Стронцій (Sr) і фосфор (P) з відповідними рівнями 0,060899% і 0,0578% також присутні, що може вказувати на наявність певних промислових або побутових відходів. Свинець (Pb) з концентрацією 0,0164% та кадмій (Cd) з дуже низькою концентрацією 3,94E-05% є занепокоєнням з точки зору екологічної безпеки, оскільки ці метали важкі і токсичні.

Аргентум (Ag) та ніобій (Nb) також присутні у дуже низьких концентраціях. Відсутність галію (Ga), рубідію (Rb), цирконію (Zr), молібдену (Mo), олова (Sn) та рутенію (Ru) може вказувати на те, що ці елементи не є поширеними у складі побутових відходів, що потрапляють на полігон.

Ці дані важливі для розуміння потенційного впливу спалювання цієї суміші відходів на довкілля, особливо з точки зору викидів важких металів та інших токсичних речовин. Аналіз усередненої суміші деревних пелет показує наявність різноманітних хімічних елементів, але у значно менших концентраціях порівняно з сумішшю відходів з Рибненського полігону. Серед виявлених елементів:

Вміст броду (Br) відсутній, що може бути характерно для деревних пелет, які зазвичай не містять цього елемента.

Мідь (Cu) і стронцій (Sr) присутні у досить низьких концентраціях, що може бути пов'язано з природним вмістом цих елементів у деревині.

Фосфор (P) має вищу концентрацію порівняно з іншими елементами, що може бути характерним для органічного матеріалу, такого як дерево.

Дуже низькі рівні свинцю (Pb), кадмію (Cd) та інших важких металів свідчать про екологічну безпечність цих пелет.

Наявність галію (Ga), рубідію (Rb), цирконію (Zr), молібдену (Mo), олова (Sn) та рутенію (Ru) в мікроскопічних кількостях може бути пов'язана з натуральними властивостями різних видів деревини.

Ці дані важливі для оцінки якості та екологічної безпеки деревних пелет як джерела відновлюваної енергії, особливо у порівнянні з традиційними відходами. Відсутність або мінімальний рівень важких металів у пелетах робить їх більш прийнятними з точки зору екологічного впливу при спалюванні.

3.5 Дослідження рівня викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря під час спалювання різних видів побутових відходів та твердопаливних пелет

У дисертаційному дослідженні приділено увагу такому важливому параметру при спалюванні побутових відходів, як викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря, в тому числі хімічні сполуки і тверді частинки. Вирішення цього аспекту є ключовим для забезпечення ефективності та екологічної безпеки процесу видалення відходів.

Оксиди азоту (NO_x) та сірки (SO_x): Ці речовини є основними представниками хімічних сполук, які виникають при спалюванні відходів. Вони можуть спричиняти кислотні дощі, та становити загрозу для якості повітря та здоров'я людей.

Збільшення концентрації парникових газів призводить до змін клімату, тому важливо враховувати та мінімізувати їхні викиди.

Спалювання відходів може призводити до утворення діоксинів та фуранів, які є токсичними речовинами та можуть мати негативний вплив на

здоров'я людей та довкілля. Викиди твердих частинок в атмосферне повітря можуть призводити до забруднення повітря, а також викликати респіраторні та інші захворювання у людей.

В деяких випадках, спалювання може призводити до викидів важких металів, які можуть накопичуватися в навколишньому середовищі та впливати на екосистеми.

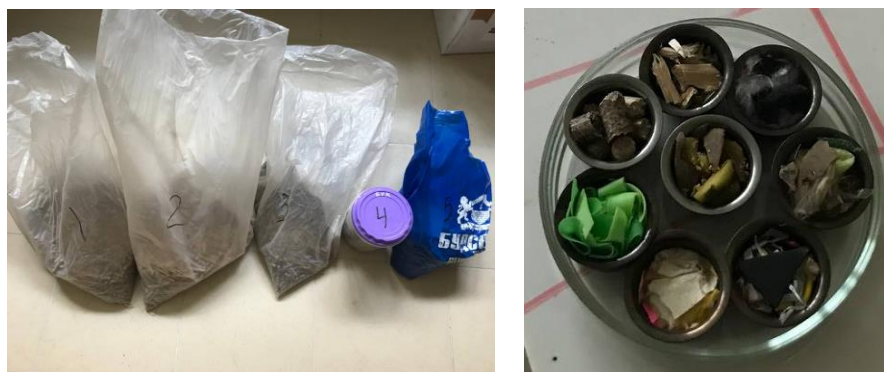
Для зменшення впливу викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря важливо використовувати сучасні технології очищення відходів та ефективні системи фільтрації, щоб забезпечити безпечний та екологічно чистий процес спалювання. Крім того, сприяння відновлювальним джерелам енергії та розвиток альтернативних методів обробки відходів може сприяти зниженню викидів та поліпшенню якості повітря.

Проведено дослідження викидів у повітря різних видів відходів, зокрема деревних твердопаливних пелет, виготовлених із різних видів деревини. Під час експедиції на КП «Полігон ТПВ» у селі Рибне були зібрані проби для подальших досліджень. Аналізовано рівень викидів у повітря суміші відходів, відповідної морфологічному складу полігону КП «Полігон ТПВ». Також проведено порівняльний аналіз рівня викидів та калорійності для кожного виду відходів, твердопаливних пелет і їх комбінацій.

Досліджено рівні викидів забруднюючих речовин у повітря для різних видів відходів (пластик, біовідходи, гума, папір, текстиль, дерево тощо) та різних видів твердопаливних деревних пелет (дуб, бук, хвоя тощо). Розроблено графік для порівняння калорійності різних видів відходів та пелет до рівнів викидів у повітря. Застосовувалося програмне забезпечення Microsoft Excel для спрощення розрахунків. Реальні значення калорійності, отримані за допомогою калориметра ІКА С1, та рівні викидів забруднюючих речовин у повітря, вимірювані газоаналізатором ОКСІ 5М та аналізатором якості повітря СЕМ DT-9881, використовувались для визначення.

Проби відходів та твердопаливних пелет було піддано процесу спалювання у твердопаливному котлі. Після повного спалювання кожного з

дослідних зразків, процес очищення робочої частини котла від золи та продуктів спалювання було виконано. Загалом було підготовлено 16 проб палива, з яких 8 становили твердопаливні пелети (рисунок 3.9, а), а інші 8 - твердопаливні відходи (рисунок 3.9, б).



а

б

Рисунок 3.9 – Дослідні зразки та об'єкт для їх спалювання

Таблиця 3.6 – Викиди в атмосферне повітря досліджуваних проб

	Тип палива	Пил 2.5	Пил 10	CO	NO	NO _x	NO ₂	SO _x	SO ₂
A	Пластик	0,00097	0,27788	51	582	462	40	440	440
B	Гума	0,00128	0,3248	81	762	504	0	640	640
C	Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%	0,00057	0,00546	20	30	6	37	1	2
D	Суміш відходів Рибненського полігону	0,00078	0,12567	40	246	234	40	170	235
E	Бук	0,00039	0,00329	15	48	36	4	1	1
F	Топінамбур	0,00049	0,00347	23	84	54	40	2	1
G	Текстиль	0,00075	0,12462	56	342	348	231	440	440
H	Усереднена суміш пелет	0,00051	0,00412	22	54	24	80	1	2
I	Хвоя-50% Бук-30% Дуб 20%	0,00061	0,00427	20	42	0	49	33	39
J	Дуб	0,00046	0,00363	23	54	30	120	2	3
K	Хвоя (2)	0,00058	0,00396	26	72	18	37	1	1
L	Дерево	0,00056	0,00129	29	146	200	40	160	160
M	Хвоя (1)	0,00047	0,00474	25	60	6	93	1	3
N	Біовідходи	0,00054	0,00168	25	82	93	25	24	89
O	Папір, картон	0,00046	0,00135	47	510	438	120	320	320
P	Несортований горючий залишок	0,0009	0,01847	38	444	510	40	680	680

За допомогою даних, представлених у таблиці, можливо створити зведений графік, що візуалізує отримані результати (рисунок 3.10). Це

дозволить наочно показати тенденції та взаємозв'язки між різними параметрами дослідження.

Аналіз графіка виявив, що викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря найвищі у випадку спалювання гуми, Органічні відходів та пластику. Серед досліджених матеріалів, суміш пелет (30% хвої, 30% бука, 40% дуба) показала найкраще співвідношення калорійності (18399 Дж/г) до викидів, що робить її перспективним варіантом для використання як енергетичного ресурсу з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

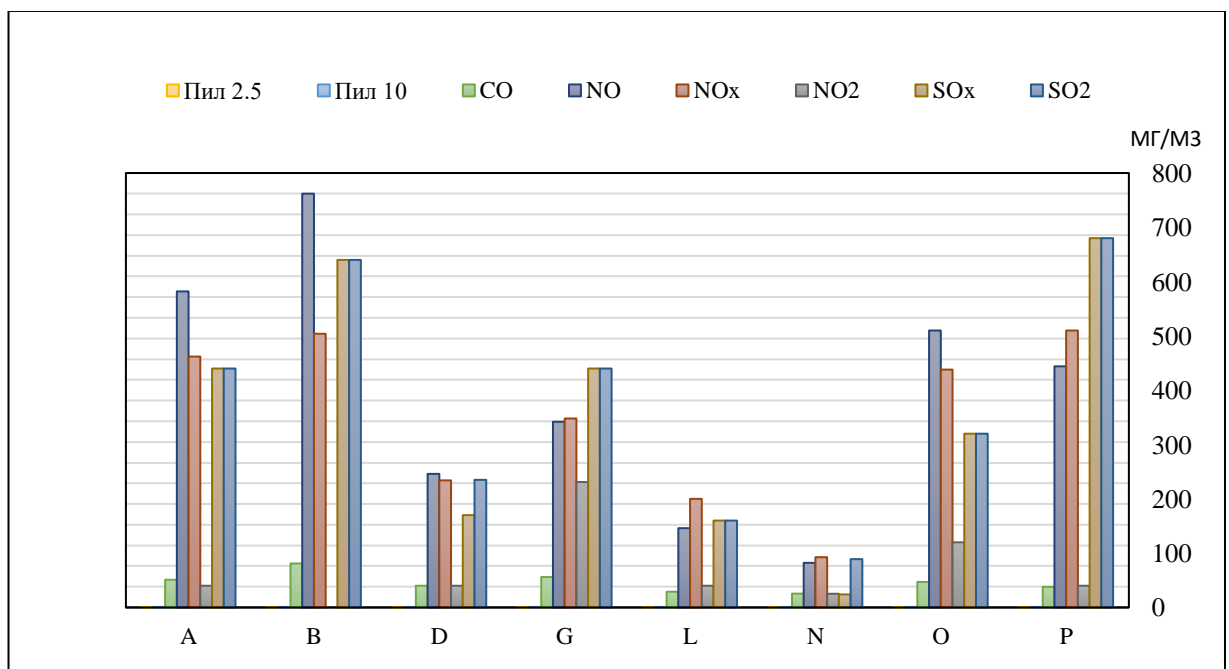
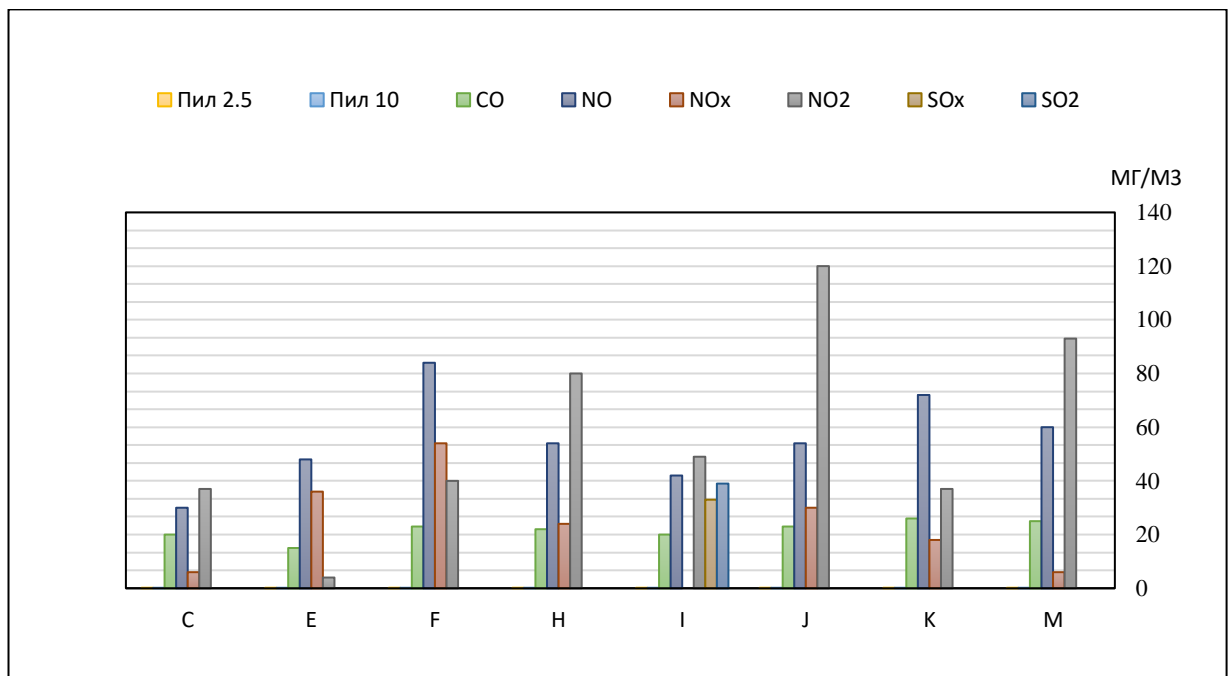


Рисунок 3.10 – Графіки порівняння рівня викидів в атмосферу

Аналіз даних вказує, що несортовані горючі залишки мають найгірше співвідношення калорійності до викидів (9622 Дж/г), що вказує на їх низьку енергетичну ефективність та високий екологічний ризик. Натомість, суміш пелет (хвоя 30%, бук 30%, дуб 40%) продемонструвала високу калорійність при низьких викидах, що робить її більш привабливою як екологічно стійке джерело енергії.

Висновки до розділу 3

1. У ході дослідження було проведено аналіз рівня зольності різноманітних видів відходів, таких як пластик, біовідходи, гума, папір, текстиль, дерево, а також різних типів твердопаливних деревних пелет (дуб, бук, хвоя та інші). Для цього було розроблено графік, який спрощено візуалізує відношення калорійності різних видів відходів та пелет до їх зольності. Сформовано та проаналізовано графік рівнів зольності для різних типів відходів.

2. Визначено вміст хімічних елементів в побутових відходах полігону с. Рибне. В залежності від виду відходів, він буде мати різний хімічний склад та всі представлені в основному сумішшю відповідних оксидів.

3. Проведено аналіз вмісту хімічних елементів в золі твердопаливних пелет. Визначено, що пелети є екологічно чистим паливом, що є важливою його характеристикою

4. Проведено аналіз калорійності та зольності: встановлено відношення калорійності до зольності, що є ключовим для визначення енергетичної цінності та екологічної безпеки відходів.

Дослідження підкреслює необхідність розвитку методів переробки побутових відходів для виробництва енергії. Аналіз калорійності сумішей різних типів відходів та деревних пелет виявив, що деякі види пелет, зокрема суміш хвої, бука та дуба, ефективні як джерело енергії за рахунок високої калорійності та низьких рівнів викидів. Тим часом, несортовані горючі

залишки мають низьку калорійність і високі рівні викидів. Отже, дослідження вказує на потенціал пелет як більш сталого варіанту для виробництва енергії.

5. Дослідження, проведене на території КП «Полігону ТПВ» у селі Рибне, включає використання нейронних мереж для оптимізації паливних сумішей, враховуючи локальну специфіку генерації відходів. Це дозволяє ефективно переробляти відходи на місці їх утворення, зменшуючи негативний вплив на довкілля та сприяючи збереженню природних ресурсів. Центральною метою дослідження є розробка технології, що дозволить використовувати побутові відходи як ефективне джерело енергії.

РОЗДІЛ 4 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОДУКУВАННЯ ПАЛИВА З КОПОЗИЦІЙ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ТА ТВЕРДОГО ПАЛИВА

4.1 Термічний потенціал різноманітних сумішей твердих побутових відходів до твердопаливних пелет

Основним показником який характеризує побутові відходи та твердопаливні палети з економічної точки зору є їх калорійність.

Побутові відходи та твердопаливні пелети є цінним джерелом енергії. Для оцінки їх економічної ефективності важливо знати їх калорійність.

У дослідженні було вивчено калорійність різних типів побутових відходів та твердопаливних пелет, виготовлених з різної деревини. Було проаналізовано калорійність суміші побутових відходів, що відповідає морфологічному складу полігону КП «Полігон ТПВ» у с. Рибне, а також суміші твердопаливних пелет, виготовлених з різних видів деревини.

Дослідження показало, що калорійність побутових відходів залежить від їх складу. Найнижчу калорійність мають такі види побутових відходів, як біовідходи та несортований горючий залишок. Найвищу калорійність мають пластикові та гумові побутові відходи. Калорійність твердопаливних пелет також залежить від виду деревини, з якої вони виготовлені. Найвищу калорійність мають твердопаливні пелети, виготовлені з дуба. Найнижчу калорійність мають твердопаливні пелети, виготовлені з хвої.

На основі отриманих результатів було розроблено алгоритм розрахунку калорійності сумішей побутових відходів та твердопаливних пелет. Цей алгоритм дозволяє визначити кількість теплової енергії, яка може бути отримана при спалюванні суміші побутових відходів та твердопаливних пелет з різним відсотковим співвідношенням компонентів. Технології перетворення відходів в енергію (WtE) є різноманітними та можуть включати спалювання, газифікацію та інші процеси. Технології WtE дозволяють зменшити обсяги

побутових відходів та отримати енергію, яка може бути використана для виробництва електроенергії, тепла та інших корисних продуктів.

У дослідженні було використано програмне забезпечення Microsoft Excel для спрощення розрахунків. Це програмне забезпечення дозволяє швидко та легко виконувати розрахунки, що вимагають використання складних формул. Відбір проб відходів здійснено на полігоні КП «Полігон ТПВ» с. Рибне, в літньо-осінній період. Загальна кількість зразків становила 7 проб, по 1 кг., кожного виду ТПВ (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Відбір проб побутових відходів на полігоні с. Рибне

Було створено 7 зразків вагою по 1 кг кожен, відповідно до заданого складу компонентів, а також підготовлена додаткова серія дослідних зразків (деревні пелети). Ці зразки, включаючи відходи та деревні пелети, були приготовані для аналізу з метою оцінки їх фізико-хімічних властивостей та визначення їх енергетичної цінності за допомогою калориметричних вимірювань. У рамках підготовки до запланованих досліджень, зразки спочатку були дрібно подрібнені в ножовому подрібнювачі до розміру частинок не більше 0,1 мм.

Рівень теоретично можливої теплотворної здатності сумішей ($K_{\text{суміш}}$) відходів та твердопаливних деревних пелет розраховувався за формулою:

$$K_{\text{суміш}} = \sum_{i=1}^n (K_i \times d_i)$$

K_i – калорійність одного із компонентів суміші;

d_i – відсоткове значення компоненту суміші

Дану формулу можна масштабувати і застосовувати для більш складніших сумішей. Формула не враховує вологість компонентів, оскільки лабораторний аналіз калориметром ІКА С1, передбачає використання висушених зразків.

Розрахунки співвідношень були виконані за допомогою програми Microsoft Excel, як показано в таблиці 4.1. Обчислення охоплювали діапазон від 10% відходів і 90% деревних пелет до 90% відходів і 10% деревних пелет. На рисунку 3 представлено ілюстрацію рівня енергетичної цінності сумішей за умови співвідношення 50% відходів до 50% деревних пелет.

Таблиця 4.1 – Рівень калорійності відходів полігону КП «Полігон ТПВ»
с. Рибне

Калорійність суміші при співвідношенні 50%-відходів, 50%-пелет								
<i>Вид палива</i>	<i>50%</i>	<i>Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%</i>	<i>Дуб</i>	<i>Усереднена суміш пелет</i>	<i>Хвоя-50% Бук-30% Дуб 20%</i>	<i>Топінам бур</i>	<i>Хвоя (разом)</i>	<i>Бук</i>
<i>50%</i>	Середня калорійність (Дж/г)	18399	18313	17947,1667	17882	17728	17693	17668
<i>Пластик</i>	39970	29184,667	29141,67	28958,75	28926,17	28849,1667	28831,67	28819,17
<i>Гума</i>	32373	25386	25343	25160,0833	25127,5	25050,5	25033	25020,5
<i>Суміш відходів Рибненського полігону</i>	18487,9067	18443,453	18400,45	18217,5367	18184,95	18107,95333	18090,45	18077,95
<i>Текстиль</i>	17580	17989,333	17946,33	17763,4167	17730,83	17653,83333	17636,33	17623,83
<i>Біовідходи</i>	13637	16018	15975	15792,0833	15759,5	15682,5	15665	15652,5
<i>Папір, картон</i>	13457	15927,833	15884,83	15701,9167	15669,33	15592,33333	15574,83	15562,33
<i>Несортований горючий залишок</i>	9622	14010,333	13967,33	13784,4167	13751,83	13674,83333	13657,33	13644,83

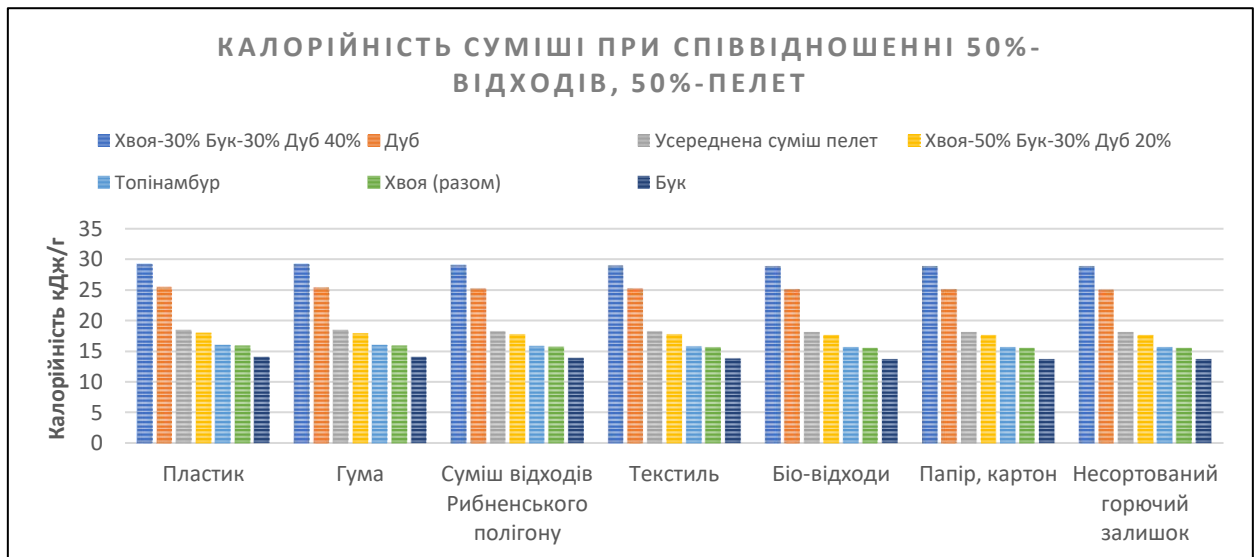


Рисунок 4.3 – Калорійність суміші при співвідношенні 50%-відходів, 50%-пелет

Дані щодо теплотворної здатності суміші побутових відходів полігону КП «Полігон ТПВ» с. Рибне до усередненої суміші пелет, при різних відсоткових значеннях наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Рівні калорійності суміші побутових відходів полігону КП «Полігон ТПВ» с. Рибне до усередненої суміші пелет

Суміш відходів Рибненського полігону	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Усереднена суміш пелет	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
Калорійність суміші (Дж/г)	18001, 24	18055, 31	18109, 39	18163, 46	18217, 54	18271, 61	18325, 68	18379, 76	18433, 83

Згідно із табл. 4.4 можна побачити тенденцію збільшення теплової енергії, що утворюється при спалюванні, при збільшенні кількості відходів у суміші.

4.2 Статистична оцінка калорійності, зольності та потенційного хімічного забруднення при спалюванні сумішей побутових відходів та твердопаливних пелет

Проведення коректного статистичного аналізу даних перш за все базується на знаходженні типу розподілу неперервних даних які приймає змінна. Перевірка на нормальність проводиться для того щоб виявити тип розподілу даних у змінних. Якщо дані розподілені нормально то це дозволяє у подальшому використовувати параметричні методи аналізу такі як t-критерій Стюдента, ANOVA та ін

Для перевірки на нормальність еталоном вважається критерій Шапіро-Вілка. (рис. 4.4). Для уточнення результатів також використовувався критерій узгодженості Колмогорова —Смірнова. Нульова гіпотеза для цих критеріїв говорить наступне – розподіл даних не є нормальним (альтернативна відповідно говорить протилежне). При оцінці даних прийнято вважати що для критерію Шапіро-Вілка при рівні p більшому за 0,05 нульова гіпотеза відкидається, для критерію Колмогорова —Смірнова вона відкидається при рівні p більшому за 0,2. Результати оцінки нормальності також перевірялись графічним методом (табл. 4.3).

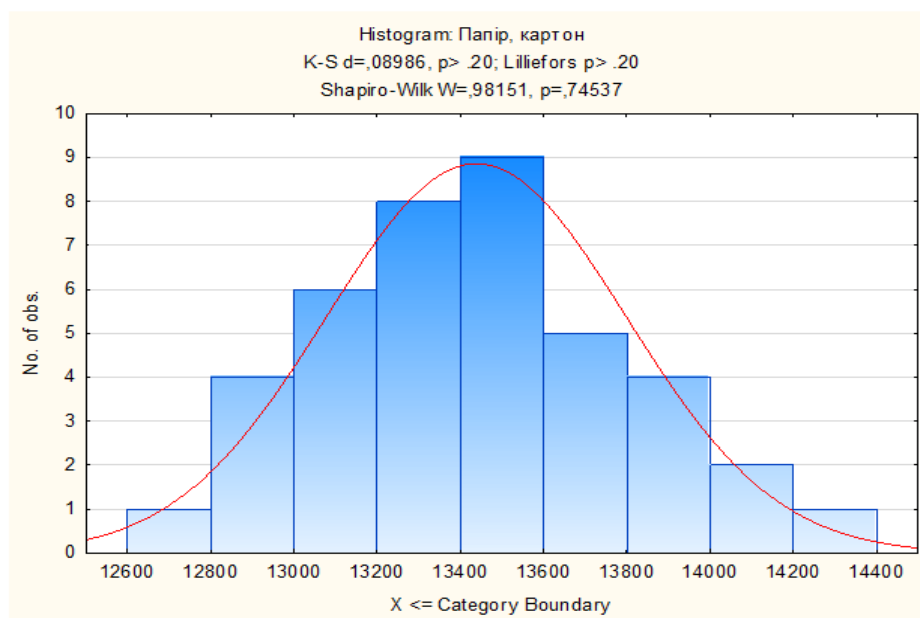


Рисунок 4.4 – Гістограма нормального розподілу для змінної папір, картон

Таблиця 4.5 – Результати оцінки нормальності для змінної папір

Frequency table: Папір, картон (CHUPA1 in WorkbookG2023.stw)						
K-S d=,08986, p> .20; Lilliefors p> .20						
Shapiro-Wilk W=,98151, p=,74537						
Category	Count	Cumulative Count	Percent of Valid	Cumul % of Valid	% of all Cases	Count
12600,00<x<=12800,00	1	1	2,50000	2,5000	2,50000	1
12800,00<x<=13000,00	4	5	10,00000	12,5000	10,00000	5
13000,00<x<=13200,00	6	11	15,00000	27,5000	15,00000	11
13200,00<x<=13400,00	8	19	20,00000	47,5000	20,00000	19
13400,00<x<=13600,00	9	28	22,50000	70,0000	22,50000	28
13600,00<x<=13800,00	5	33	12,50000	82,5000	12,50000	33
13800,00<x<=14000,00	4	37	10,00000	92,5000	10,00000	37
14000,00<x<=14200,00	2	39	5,00000	97,5000	5,00000	39

Як видно з таблиці вище, критерій Шапіро-Вілка (Shapiro-Wilk) рівний 0,98. Це означає з імовірністю 98 відсотків розподіл являється нормальним. При цьому р-рівень у даному аналізі більший за 0,05 – (а саме 0,74) це означає що нульова гіпотеза про відсутність нормального розподілу даних може бути відкинута. (рис. 4.5). Перевірка на нормальність інших пар змінних показує подібні результати критерію Шапіро-Вілка, значення яких коливаються у межах 0,90-0,95. Уточнюючий (контрольний) критерій Колмогорова – Смірнова підтверджує наше припущення про нормальність розподілу – р-рівень даного критерію більший за 0,2 На рисунку 4.5 представлено нижче показані графік розподілу даних для змінної папір, картон. На графіку червоною лінією показаний передбачуваний нормальний розподіл даних, сині крапки – експериментальні спостереження.

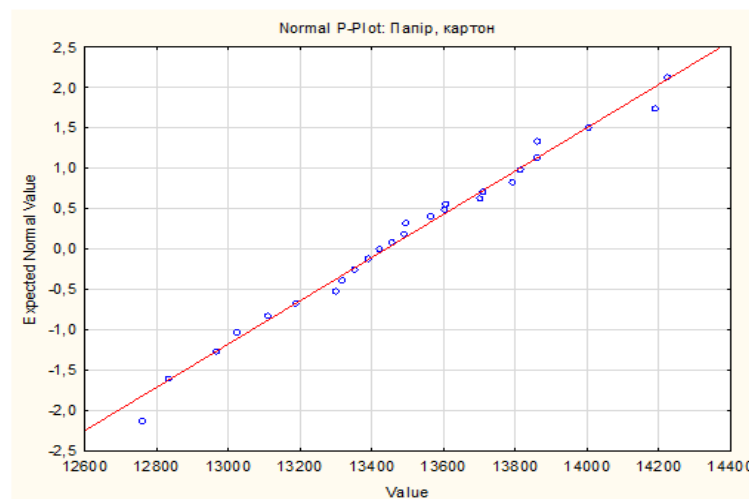


Рисунок 4.5 – Нормальний розподіл даних для змінної папір, картон

Нормальний розподіл даних є базовою необхідною умовою для проведення подальших параметричних статистичних досліджень.

У результаті проведених досліджень всі дані які були отримані експериментальним шляхом були перевірені за допомогою критеріїв Шапіро-Вілка та Колмогорова – Смірнова. У результаті перевірки величина критерію Шапіро-Вілка коливалась у межах $W = 0,90-0,97$ а відповідно всіх змінних гіпотеза про нормальність розподілу не відкидалась з високим рівнем статистичної достовірності. Також були побудовані гістограми розподілу, які підтверджували гіпотезу про нормальність розподілу змінних (рис. 4.4, рис. 4.5).

4.3 Прогнозування оптимального співвідношення складу суміші побутових відходів та твердопаливних пелет за допомогою штучних нейронних мереж

Для побудови штучних нейронних мереж у роботі, був використаний програмний пакет STATISTICA [104]. Вхідні дані вносились та групувались у програмному продукті Excel (рис 4.6, рис. 4.7) та переносились у пакет STATISTICA.

	Вид палива	Папір, картон	Пластик	Текстиль	Дерево	Гума	Біо-відходи	Несорт овочів горючі й залишок	Дуб	Хлоп-30% Бук-30% Дуб-40%	Хлоп-50% Бук-30% Дуб-20%	Топінам бур	Хлоп (1)	Хлоп (2)	Бук	Увередн ена суміш пелет	Співв віднодіа Рубіенс ького поліноу	
3			12831	38771	17984	17050	33992	13951	9910	17580	19135	17587	18136	16584	17401	18551	17853,6	18915,9
4			12966	40890	17290	17651	31839	14046	9463	17214	19319	18418	16664	17352	18578	18074	17945,7	18696,3
5			13024	39311	18459	18360	33118	12819	9141	18011	18095	18597	17435	16761	18100	18375	17910,6	18758,5
6			13110	41169	17052	16870	33668	13412	9237	19229	18951	18293	17019	16937	18224	16785	17919,6	18743,8
7			13188	38372	18107	18485	33344	13228	10007	17397	18822	16988	18614	18349	16808	17376	1795,1	18918,5
8			13860	37572	16701	17409	31078	14182	10103	18734	17295	17167	16842	18049	16985	16961	17433,3	18287,1
9			13315	37972	18283	18844	30754	13092	9843	19046	17479	16809	18260	18525	17162	16608	17698,4	18420,9
10			13860	41969	16876	17229	30431	12955	9333	18862	17663	18776	17196	17114	18401	17138	17878,6	18526,4
11			13301	41569	16525	18665	31402	14319	9044	17764	17847	17346	18437	18172	16631	18198	17770,7	18723,8
12			13790	40748	18026	17397	32049	13902	9151	18669	17835	16938	18199	17103	16759	17127	17518,5	18833,9
13			13420	39300	18513	18296	33404	14268	9525	17752	18215	18357	18293	18111	18142	18231	18157,3	18974,8
14			13390	41821	17041	18778	34091	13931	9327	17418	17428	17008	18178	18460	16828	18486	17686,4	19323
15			13493	38016	17404	18335	33003	13340	9866	19285	18887	17492	16861	17467	18037	18606	18090,7	18645,4
16			13350	42092	18140	17536	30790	13219	9877	18799	18796	18831	17342	17839	18075	18117	18257	18882,1
17			13490	40414	16651	18519	32733	13999	10132	18778	18603	17703	18669	17347	17307	17864	18038,9	18910,6
18			13600	37860	17775	16999	32733	14071	9412	18708	18985	18081	18073	18091	17890	17372	18171,4	18537,1
19			13710	41244	17959	17070	30664	13789	9729	17346	17500	18710	17925	17986	17151	18050	17809,6	18672,1
20			13702	39099	17775	18403	33195	12970	9114	18130	17998	18336	17551	18024	17516	17283	17833,9	18649,4
21			13563	40414	17922	18423	31667	13408	9928	17914	18603	17582	18111	17258	18257	18012	17962,4	18952,5

Рисунок 4.6 – Вхідні дані для побудови нейромереж

Після опрацювання вхідні дані переносились у програму STATISTICA.

The screenshot shows the STATISTICA 14 interface with a data table and a dialog box for sampling methods. The data table has 16 columns representing different variables and 29 rows of data. The dialog box is titled 'Sampling (CVN and ANS)' and shows settings for random sampling, including training and test percentages, validation percentage, and seed for sampling.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Пил, картон	Пластик	Текстиль	Дерево	Гума	Біо-відходи	Нерозсортовані	Дуб	Коса-30% Бук	Коса-50% Бук	Топіканьбур	Коса (1)	Коса (2)	Бук	Інтермедіана	Сума всіх відходів
2	12966	40890	17290	17651	31839	14046	9463	17214	19319	18418	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
3	13024	39311	18459	18360	33118	12819	9141	18011	18095	18597	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
4	13110	41169	17052	16870	33668	13412	9237	19229	18951	18293	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
5	13198	38773	18107	18485	33344	13228	9007	17397	18822	16986	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
6	13860	37572	18701	17409	31078	14182	10103	18734	17295	17167	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
7	13315	37972	18283	18844	30754	13092	9843	19046	17479	16809	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
8	13860	41969	16876	17229	30431	12955	9333	18862	17663	18776	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
9	13301	41569	16525	18665	31402	14319	9044	17764	17847	17346	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
10	13790	40748	18026	17397	32049	13902	9151	18669	17835	16938	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
11	13420	39300	18513	18296	33404	14268	9525	17752	18215	18357	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
12	13390	41821	17041	18778	34091	13931	9327	17418	17428	17008	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
13	13493	38016	17404	18335	33003	13340	9866	19285	18887	17492	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
14	13350	42092	18140	17536	30790	13219	9877	18799	18796	18831	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
15	13490	40414	16651	18519	32733	13999	10132	18778	18603	17703	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
16	13600	37860	17775	16999	32733	14071	9412	18708	18995	18081	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
17	13710	41244	17959	17070	30664	13789	9729	17346	17500	18710	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
18	13702	39099	17775	18403	33195	12970	9114	18130	17998	18336	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
19	13563	40414	17922	18423	31667	13408	9928	17914	18603	17582	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
20	13606	38746	17196	17646	33232	13789	9460	18516	19375	18230	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
21	13814	39571	16720	18146	31830	13983	9729	18096	18866	18268	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
22	14189	40833	18046	17768	31381	14361	9809	18516	18991	18081	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
23	14002	40986	18393	18899	33872	13501	10067	18896	19251	18452	16792	17839	18512	18137	18268,3702	19343,9943
24	14221	41031	17285	18146	33072	12917	9829	19161	18757	17334	18549	18579	17396	16735	18073,0427	18834,7102
25	18497	39970	17580	17947	32373	18637	9622	18313	18399	17882	17728	17643	17693	17668	17947,16	18487,9
26	12831	38771	17984	17050	33992	13951	9910	17580	19135	17587	18136	16584	17401	18551	17853,7398	18915,8991
27	12966	40890	17290	17651	31839	14046	9463	17214	19319	18418	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341
28	13024	39311	18459	18360	33118	12819	9141	18011	18095	18597	17435	18100	18375	17910,647	18758,5491	
29	13110	41169	17052	16870	33668	13412	9237	19229	18951	18293	17019	16937	18224	16785	17919,6366	18743,7675
30	13198	38773	18107	18485	33344	13228	9007	17397	18822	16986	16664	17352	18578	18074	17945,6935	18696,341

Рисунок 4.7 – Вхідні дані та налаштування для навчання штучної нейронної мережі.

У процесі досліджень було створено групу нейронних мереж які в подальшому були об'єднані у одному програмному пакеті. Цвілевою категорією для всіх мереж у наших дослідженнях виступала калорійність. Неперервними вхідними змінними виступають різні групи даних для різних мереж. Перша група даних була на яких навчалась нейромережа це кількість викидів газів які утворюються в процесі горіння – CO, NO, SO₂, SO_x, NO_x, NO₂. Друга група включала дрібнодисперсний пил - Пил pm_{2,5} та Пил pm₁₀. Третя група включала зольність та важкі метали які утворювались в після спалювання.

Навчання нейромережі проводиться на базі вибірки “train”, яка генерується випадковим чином з наявних елементів загальної вибірки. Для аналізу результатів роботи нейромережі формується контрольна підвибірка “test” на якій отримані алгоритми та залежності перевіряються. (рис. 4.8)

У загальному, підвибірки вибирались за класичним співвідношенням - 70% - навчальна, 15% - контрольна, 15% -тестова підвибірки. Функціями активації для прихованих та вихідних нейронів обирались - логістична, гіперболічна, експонента (Logistic, Tanh, Exponential). Важливими параметрами що були обрані при побудові ANN на база STATISTICA є :

кількість прихованих нейронів – від 10 до 50, затухаюча регуляризація ваги нейронів (weight decay) – від 0.001 до 0.01 (для прихованих шарів), кількість мереж для навчання - 20. У результаті навчання отримано набір із нейромереж з різними показниками продуктивності. Для подальшої роботи вибирається одна з мереж з найкращими показниками - у даному випадку для цієї групи показників була вибрана MLP 6-23-1.

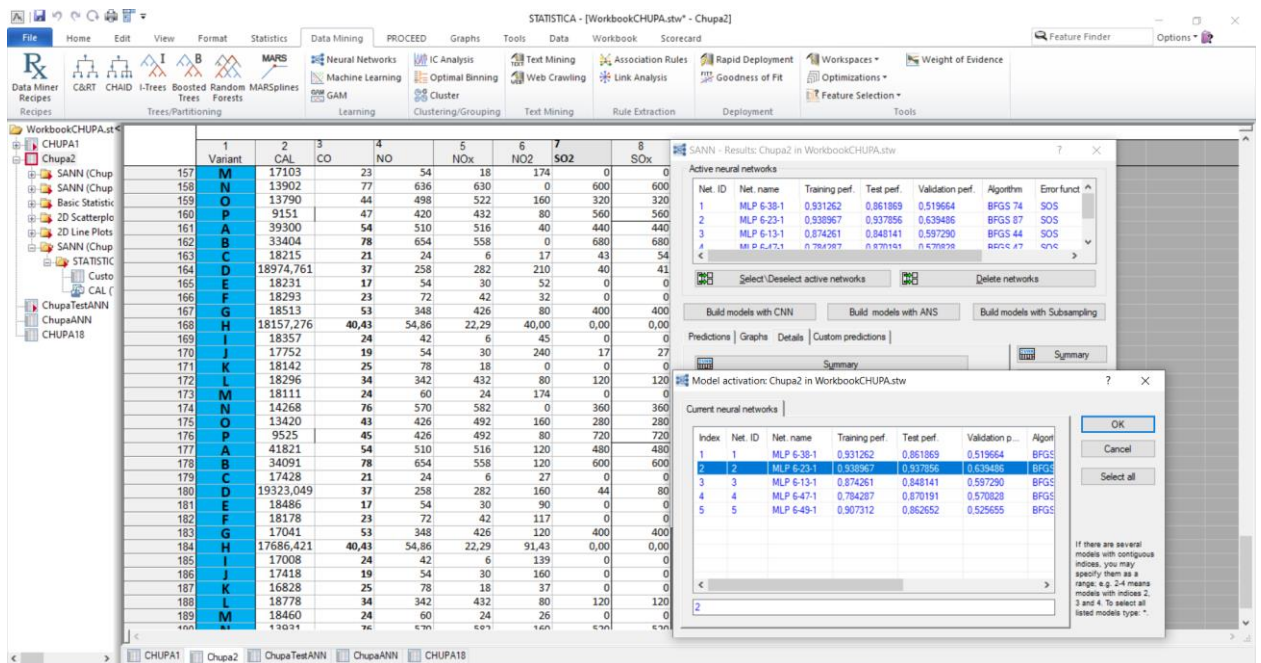


Рисунок 4.8 – Набір нейромереж з різними архітектурами та даними продуктивності навчання.

Позначення MLP 6-23-1 означає що у мережі використовується 6 вхідних, 23 прихованих та 1 вихідний нейрон. (рис. 4.9).

Summary of active networks (Chupa2 in WorkbookCHUPA.stw)						
Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Training algorithm	Hidden activation	Output activation
1	MLP 6-38-1	0,931262	0,861869	BFGS 74	Tanh	Exponential
2	MLP 6-23-1	0,938967	0,937856	BFGS 87	Tanh	Exponential
3	MLP 6-13-1	0,874261	0,848141	BFGS 44	Tanh	Logistic
4	MLP 6-47-1	0,784287	0,870191	BFGS 47	Exponential	Exponential
5	MLP 6-49-1	0,907312	0,862652	BFGS 99	Exponential	Exponential

Рисунок 4.9 Нейромережі побудовані на базі моделі ANN з уточнюючими даними

Для коректного вибору результуючої мережі варто також звернути увагу не тільки на тестову продуктивність, але і на матрицю помилок. Для цього формується матриця довірчих рівнів (confidence levels) по всіх вибірках. Як видно з рис. 4.10, червоним показано невірне прогнозування.

Predictions spreadsheet for CAL (Chupa2 in WorkbookCHUPA.stw)						
Samples: Train						
Case name	CAL Target	CAL - Output 1. MLP 6-38-1	CAL - Output 2. MLP 6-23-1	CAL - Output 3. MLP 6-13-1	CAL - Output 4. MLP 6-47-1	CAL - Output 5. MLP 6-49-1
1	38771,22	45383,63	39542,05	39715,07	43957,42	46402,52
2	33991,65	29037,17	29300,40	25012,20	19351,56	32534,36
7	17984,00	13712,63	17641,94	9948,47	9696,65	9053,34
8	17853,57	17322,66	17369,46	15701,09	18613,92	17906,73
9	17586,95	17507,52	17525,64	16123,21	18634,15	17929,79
10	17580,48	16693,74	17288,09	17797,50	18346,27	17878,64
11	17401,07	17659,33	17149,26	18440,42	18309,33	17942,25
13	16584,42	16348,98	17188,33	14516,42	15144,74	16133,93
14	13950,65	14040,00	16019,38	18561,30	22470,86	13655,48
15	12831,00	15781,62	10203,19	12384,83	20851,09	15589,44
16	9910,32	11917,51	12090,96	11618,62	12940,37	9225,08
17	40889,65	34857,56	39491,46	39415,24	42212,33	37789,28
18	31838,85	32058,22	33713,09	36280,82	34027,91	33256,06
19	19318,95	17652,96	17891,75	17822,26	18229,36	17975,04
21	18074,36	16470,71	17479,97	21502,19	16606,93	18890,07
22	16664,32	17046,85	16799,85	15863,21	15730,02	18320,71
25	18418,46	18199,09	18181,65	17202,00	16864,17	17212,43
26	17214,22	17033,14	17535,32	17174,56	18494,41	17841,40
27	18577,65	17555,16	17609,12	16797,95	18462,62	18148,80
29	17351,89	16391,49	17826,02	17537,27	18785,11	18117,51
30	14046,11	10978,85	11878,94	12354,16	15852,90	9183,13
31	12966,00	18279,64	16129,16	17852,85	23875,31	24082,00
32	9462,91	13348,74	10608,85	10312,67	9049,80	9044,37
33	39310,82	39587,23	35204,18	33047,94	39767,51	41331,53
36	18758,55	16085,46	16648,83	20771,97	18066,74	19650,16
37	18374,72	17552,94	18032,93	20164,65	15650,72	17206,33
38	17435,49	16511,99	17851,42	18434,50	17247,40	18124,80
39	18458,65	18173,26	16448,83	16721,85	20521,06	22557,17
40	17910,65	17995,77	17385,91	16597,46	18337,22	18040,74

Рисунок 4.10 – Довірчі рівні отриманої нейромережі

Також досить корисним є аналіз важливості (sensitivity analysis) змінних, які входять до нашої нейромережі (рис. 4.11). Так, для даного дослідження можна стверджувати що ознаки SO₂ та NO_x є більш значущими в прогнозуванні ніж SO_x. Тому при подальших дослідженнях, коли ми будуть змінюватись моделі, більшу увагу потрібно звертати саме на ці змінні.

Sensitivity analysis (Chupa2 in WorkbookCHUPA.stw)						
Samples: Train						
Networks	SOx	NO2	NOx	SO2	NO	CO
1.MLP 6-38-1	2,783254E+01	10,5769	22,10624	16,55886	9,82151	11,34180
2.MLP 6-23-1	3,835569E+01	6,5062	17,18333	32,37361	13,89699	12,99763
3.MLP 6-13-1	2,732515E+00	2,3765	4,80251	6,17562	11,19926	4,46538
4.MLP 6-47-1	2,175549E+00	1,4857	16,46041	5,31030	3,42125	3,87695
5.MLP 6-49-1	3,077907E+11	172,9932	41,79912	29,16811	9,51577	10,87724
Average	6,155814E+10	38,7877	20,47032	17,91730	9,57096	8,71180

Рисунок 4.11 – Аналіз важливості змінних, які входять до нейромереж

У результаті отримана нейромережа являє собою математичну модель яку можна реалізувати різними способами. Дану модель можна реалізувати за допомогою програмного коду різних мов програмування. В нашій роботі нейромережі реалізовувались за допомогою однієї з трьох головних мов програмування – Java (рис. 4.12).

```

19
20 public class Predict
21
22 {
23
24     public static void __Chupa2_in_WorkbookCHUPA_MLP_6_23_1( double[] ContInputs )
25
26     {
27
28         /*"Input Variable" comment is added besides Input(Response) variables.
29
30
31
32         int Cont_idx=0;
33
34         double _CO_ = ContInputs[Cont_idx++]; //Input Variable
35
36         double _NO_ = ContInputs[Cont_idx++]; //Input Variable
37
38         double _NOx_ = ContInputs[Cont_idx++]; //Input Variable
39
40         double _NO2_ = ContInputs[Cont_idx++]; //Input Variable
41
42         double _SO2_ = ContInputs[Cont_idx++]; //Input Variable
43
44         double _SOx_ = ContInputs[Cont_idx++]; //Input Variable
45
46         double[] __statist_max_input = new double[6];
47
48         __statist_max_input[0]= 8.400000000000000e+001;
49
50         __statist_max_input[1]= 7.620000000000000e+002;
51
52         __statist_max_input[2]= 6.300000000000000e+002;
53
54         __statist_max_input[3]= 2.500000000000000e+002;
55
56         __statist_max_input[4]= 7.600000000000000e+002;
57
58         __statist_max_input[5]= 7.600000000000000e+002;
59
60
61
62         double[] __statist_min_input = new double[6];

```

Рисунок 4.12 – Програмний код однієї з нейромереж згенерований у JAVA

Згенерований у STATISTICA код інтегрувався у середовище розробки Java IDE - IntelliJ IDEA [105]. Для практичної роботи даної нейромережі у програму потрібно відправити значення вхідних змінних. Після опрацювання вхідних даних з масиву можливих категоріальних відповідей буде вибраний найбільш прийнятне значення, після чого на виході отримаємо текстовий рядок (String) з відповідним значенням. Як зазначалось вище, для покращення рівня прогнозування були побудовані різні нейромережі які опрацьовували тільки свою частину вхідних даних. У загальному схема роботи програми подана на (рис. 4.13).

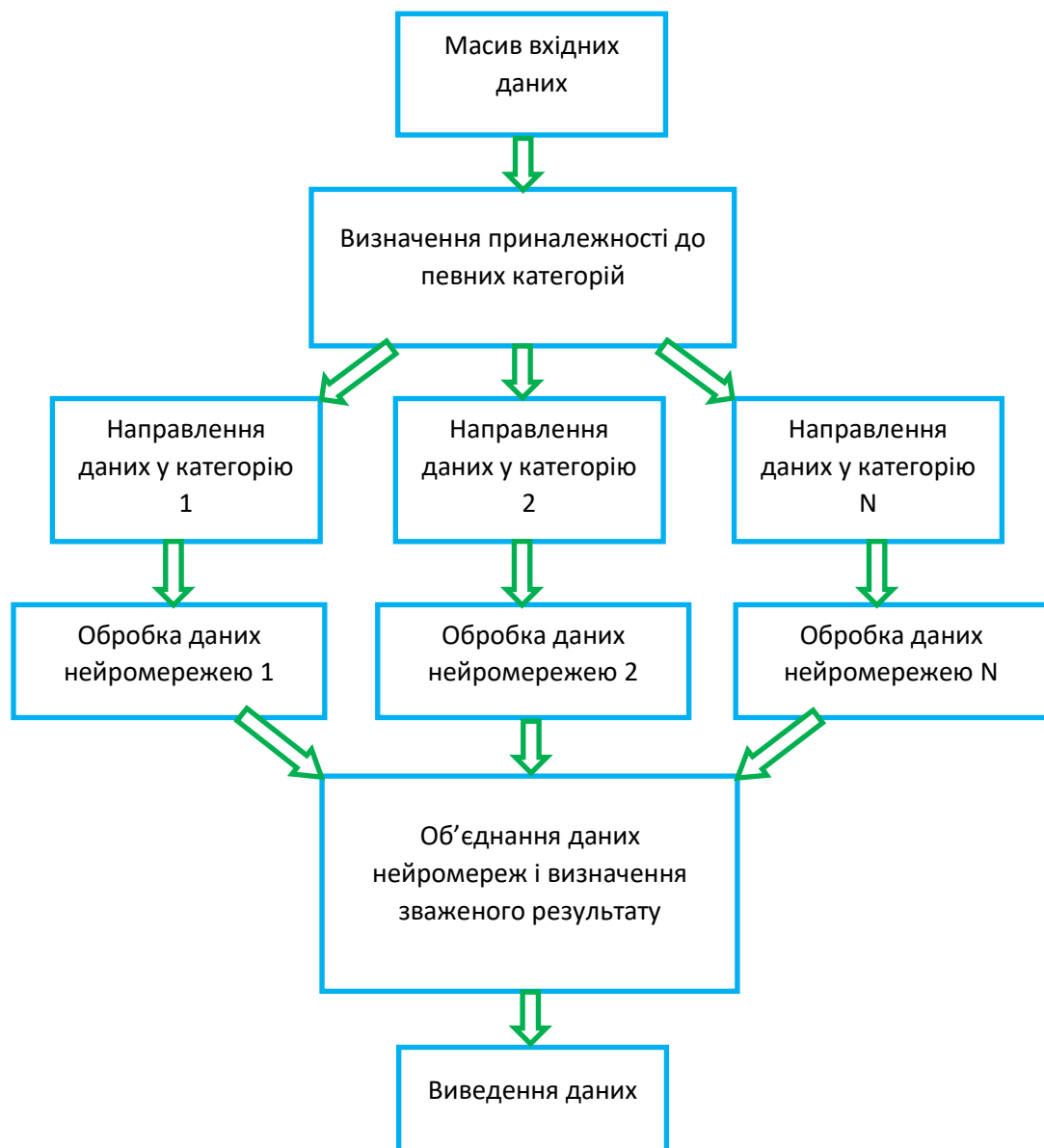


Рисунок 4.12 – Блок-схема роботи програми для прогнозування калорійності суміші побутових відходів та пелет

Ця схема є ядром функціоналу програми призначеної для прогнозування калорійності суміші побутових відходів та пелет по даних викидів. Також була побудована дзеркальна група нейромереж для прогнозування викидів по даних калорійності. У результаті був розроблений програмний комплекс здатний прогнозувати викиди, калорійність, зольність, дрібнодисперсний пил по відповідних вхідних даних.

Для покращення функціоналу програми а також для полегшення вводу даних був розроблений користувацький графічний інтерфейс (GUI). Дана програма складається з ядра базованого на штучних нейронних мережах, та оболонки, створеної, в основному, за допомогою класів `javafx.application.*`, `javafx.stage.*`, `java.awt.*` а також класів що входять у Java Development Kit 1.8 [106]. Графічний інтерфейс програми створений за допомогою Java FX. Даний фреймворк дозволяє реалізувати графічну оболонку основного коду, а також він є мультиплатформенним (програми написані з застосуванням JavaFX можуть працювати на різних операційних системах) [107]. Дизайн програми відповідає стандартам Material Design завдяки використанню бібліотеки JFoenix [108, 109].

Для запуску нашої програми (EPD) потрібно просто запустити виконуваний файл `EPD.exe` (тобто програму не потрібно окремо інсталювати). У головному вікні програми потрібно обрати відповідні випадючі меню та внести у них вхідні дані (для прикладу калорійність та тип палива). При недостатній кількості вхідних даних програма вкаже на помилку введення. Після введення даних потрібно натиснути “Submit”. Програма опрацює дані і у окремому вікні видасть категорію (чи числові дані) до якої відноситься дані, ймовірність правильної класифікації, і т.д. Як видно з опису для роботи з програмою (EPD), не потрібно особливих навиків, а робота програми є дуже швидкою (за рахунок того що вся класифікація була проведена під час навчання нейромережі). Програма займає надзвичайно мало місця (< 5 mb) і може бути записана на будь-який сучасний носій (чи навіть переслана у електронному лист) [109, 110].

4.4 Підбір оптимальних співвідношень між різними видами палива

Вибір оптимального співвідношення між різними видами пелет є складною задачею. Оптимальне співвідношення кількості елементів у суміші має відповідати кільком критеріям. Першим критерієм є екологічність – мінімум викидів в атмосферу та мінімум золи з небезпечними елементами. Другий критерій це калорійність – оптимальна суміш повинна давати високий рівень калорій. І третій критерій це ціна – якщо б не було цього критерію то всі споживачі давно б перейшли на водень. Але ціна це один з основних критеріїв при виборі твердого палива. Дана робота присвячена дослідженню енергетичного потенціалу побутових відходів, тому що даний вид пального не тільки масовий а й дешевий. Ціну суміші побутових відходів досить важко оцінити, бо вона буде сильно залежати від логістики, але можна впевнено сказати що його ціна буде значно нижчою за дрова чи пелети. У даній роботі було проаналізовано велику кількість видів твердого пального. Для вибору оптимальної суміші необхідно обмежити кількість груп які будуть в неї входити, і необхідно відкинути ті групи пального які не підходять по тих чи інших причинах. Так, на рисунку 4.13 показаний зв'язок між калорійністю та рівнем викидів в атмосферу для всіх груп досліджених у роботі.

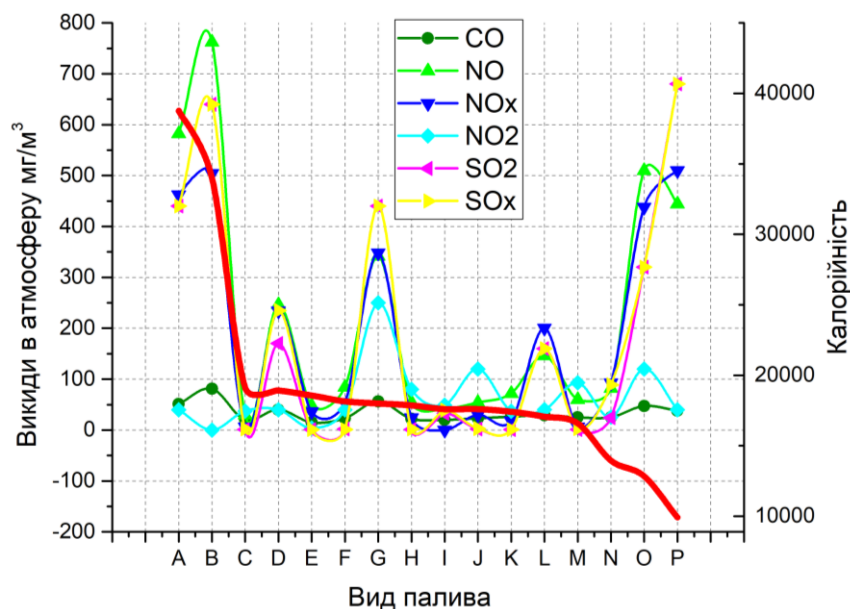


Рисунок 4.13 – Зв'язок калорійності та викидів

Як видно з рисунку, для поставлених цілей не підходить:

- варіант G(Текстиль) L(Дерево). На рис видно що при використанні цих видів палива в атмосферу викидаються значна кількість оксидів азоту, оксидів сірки та чадного газу. При цьому рівень викидів перевищує нормативні показники
- варіант N(Біовідходи) O(Папір, картон) P(Несортований горючий залишок) не підходить через викиди в атмосферу та низьку калорійність. При цьому хоча біовідходи і мають низький рівень викидів, кількість калорій при їх спалюванні є значно нижчою за інші види палива. Те ж стосується пареру/картону та несортованого горючого залишку, при цьому дані групи відрізняються ще і високим рівнем викидів
- варіант B(Гума) не підходить через надзвичайно високі показники викидів. Дана група не може бути застосована у значних кількостях.

Окремою групою є варіант А (Пластик). Доний матеріал не може бути використаний окремо через значні вики, але в невеликій кількості може бути доданий у суміш через свою надзвичайно високу калорійність та надзвичайно малу зольність.

Інша група зразків показує високі рівні калорійності та низькі рівні викидів це – С, Е, F, H, I, J, K, M – це все різні суміші пелет чи різних порід дерева. Всі ці зразки показують подібні значення як калорійності так і викидів в атмосферу. Всі ці види пального зараз використовуються у твердопаливних системах опалення. З цієї групи була вибрана суміш С (Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%), яка показує найкращі результати калорійності та викидів в атмосферу. Саме ця суміш була вибрана в якості основи суміші побутових відходів та пелет яка може бути застосована без ризиків для довкілля.

Остання група дослідних зразків це D (Суміш відходів Рибненського полігону). Як видно з графіка, рівень викидів у цієї суміші є в допустимих межах. Саме цю групу було вибрано як другий основний складник оптимальної суміші.

Для вибору оптимального співвідношення між різними видами палива у програмі Microsoft Excel був створений автоматизований обчислювальний комплекс. За його допомогою при введенні відсоткового співвідношення між різними видами палива можна отримати результуючі показники викидів в атмосферу, зольності та калорійності результуючої суміші. (рис. 4.14)

Внесіть дані у відсотках кожного складника																	
	Пластик	Гума	Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%	Суміш відходів Рибненського полігону	Бук	Топінамбур	Текстиль	Усереднені на суміш пелет	Хвоя-50% Бук-30% Дуб 20%	Дуб	Хвоя (2)	Дерево	Хвоя (1)	Біо-відходи	Папір, картон	Несортований горючий залишок	сума відсотків
	15		55	30													100
Прогнозовані дані викидів у атмосферу																	
	CAL	CO	NO	NOx	NO2	SO2	SOx	Зольність									
	22367,77	30,65	177,6	143	38,4	118	138	2,5435									

Рисунок 4.14 – Приклад обрахунку викидів, калорійності та зольності результуючої суміші що складається з 15%пластику, 55% суміші пелет та 30% суміші Рибненського полігону

Була проведена серія обрахунків, в результаті чого були встановлені межі оптимального співвідношення складників які можуть формувати мінімум викидів при максимумі калорій. На графіку (рис. 4.15) показано перехресні співвідношення викидів та калорійності для суміші С та D (суміші пелет Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40% та суміші Рибненського полігону). Показані на графіку допустимі співвідношення калорійності та викидів знаходяться в межах 50% на 50% побутових відходів та пелет. На рисунку 4.16 показана результуюча калорійність та викиди суміші що складається з Суміші відходів Рибненського полігону (D) та суміші твердопаливних пелет Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%(С). Як видно з даного рисунку, оптимальне співвідношення знаходиться у межах С60%D40% - С70%D30%

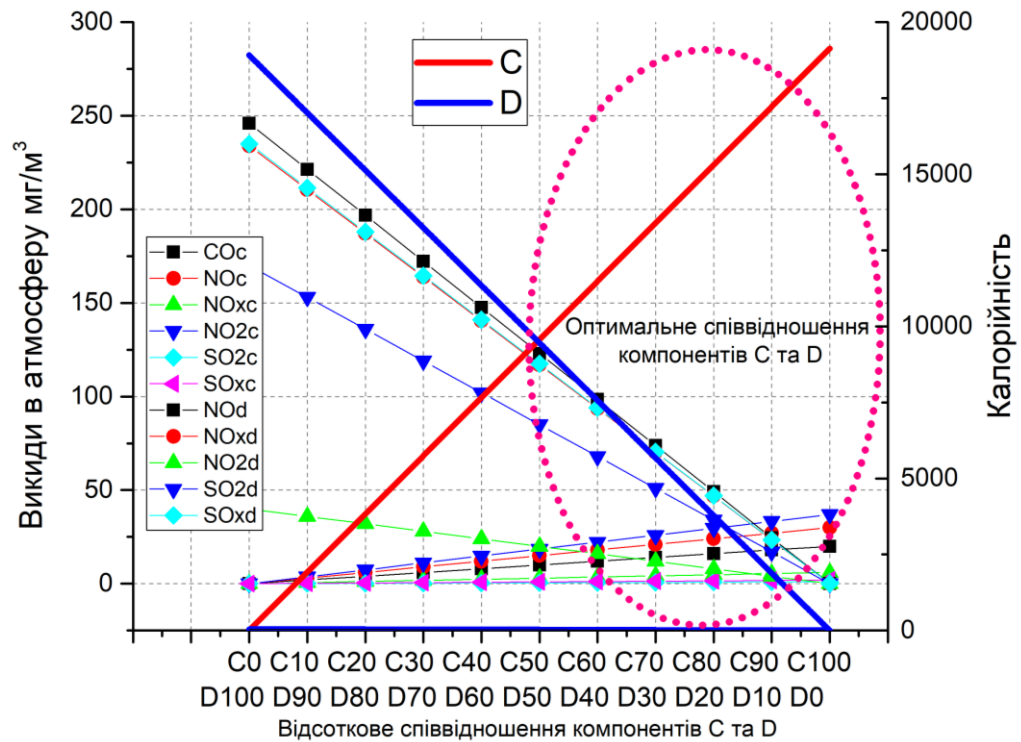


Рисунок 4.15 – Калорійність та викиди Суміші відходів Рибненського полігону (D) та суміші твердопаливних пелет Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%(C)

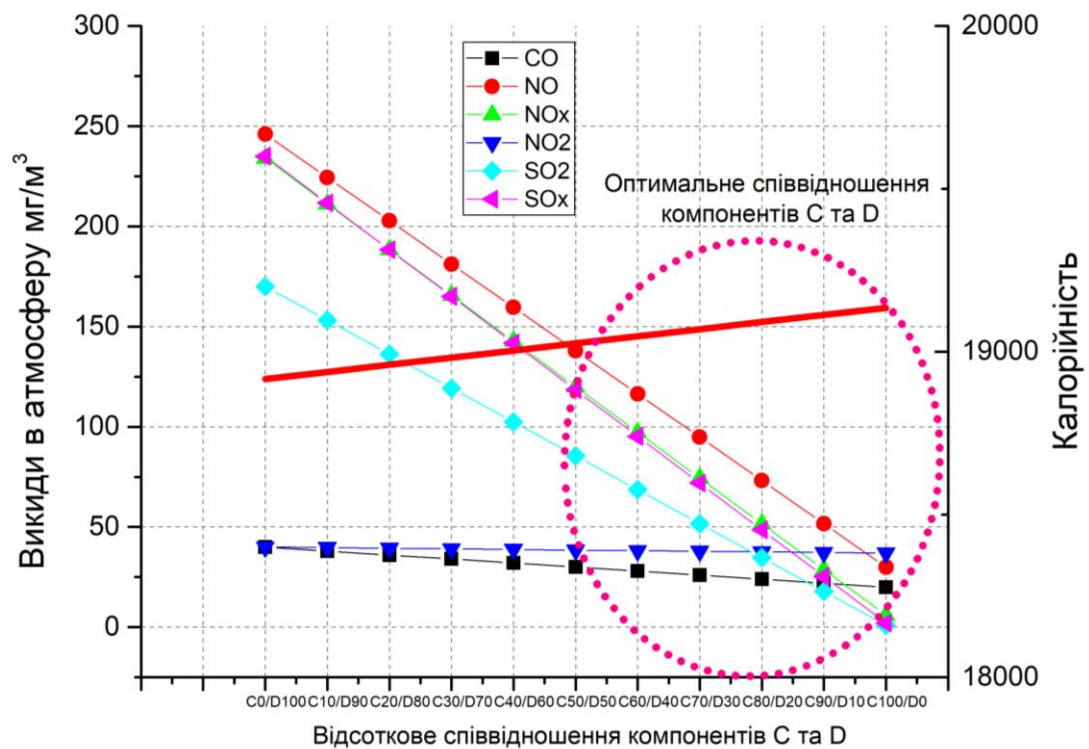


Рисунок 4.16 – Результуюча калорійність та викиди суміші що складається з Суміші відходів Рибненського полігону (D) та суміші твердопаливних пелет Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%(C)

Провівши аналогічні дослідження за допомогою нейромережевої програми для прогнозування калорійності суміші побутових відходів та пелет, було отримано подібні результати – для даного набору це С65%D35%

Було виконано низку розрахунків, які дозволили визначити оптимальні пропорції компонентів, здатних забезпечити мінімальний рівень емісій при максимальній калорійності.

Наступною ітерацією було додано невелику кількість пластику в результуючу суміш – А5-15% С45-55%D50-30%. В результаті були отримані залежності представлені в таблиці 4.6

Таблиця 4.6 – Залежності рівнів викиду, зольності та калорійності

A	C	D	CAL	CO	NO	NOx	NO₂	SO₂	SOx	Зольність
5	45	50	20086,18	31,55	165,6	142,8	38,65	107,45	140,4	3,5385
6	46	48	20314,34	31,46	166,8	142,8	38,62	108,46	140,12	3,439
7	47	46	20542,5	31,37	168	142,8	38,59	109,47	139,84	3,3395
8	48	44	20770,66	31,28	169,2	142,8	38,56	110,48	139,56	3,24
9	49	42	20998,82	31,19	170,4	142,8	38,53	111,49	139,28	3,1405
10	50	40	21226,98	31,1	171,6	142,8	38,5	112,5	139	3,041
11	51	38	21455,14	31,01	172,8	142,8	38,47	113,51	138,72	2,9415
12	52	36	21683,29	30,92	174	142,8	38,44	114,52	138,44	2,842
13	53	34	21911,45	30,83	175,2	142,8	38,41	115,53	138,16	2,7425
14	54	32	22139,61	30,74	176,4	142,8	38,38	116,54	137,88	2,643
15	55	30	22367,77	30,65	177,6	142,8	38,35	117,55	137,6	2,5435

Як видно з таблиці, при додаванні пластику рівень калорійності значно зростає, при цьому рівень викидів зростає досить повільно.

В результаті проведених обрахунків було встановлено що оптимальне співвідношення досліджених видів пального знаходиться близько А10% С50% D40%.

4.5 Опис удосконаленої технології продукування твердого палива, методом підбору оптимальних паливних композицій

У рамках Енергетичної Стратегії України на період до 2035 року основною метою є активізація використання відновлюваних джерел енергії. Планується суттєво збільшити їхню присутність у структурі енергоспоживання, довівши їхню частку до 11% в кінцевому споживанні та 8% в загальному обсязі первинних енергоресурсів. Досягнення цієї мети передбачається завдяки реалізації послідовної та передбачуваної політики з підтримки відновлюваних джерел енергії та приваблення інвестицій у цей сектор [110-113].

Основною стратегією для підвищення ефективності використання енергії в українській економіці є зменшення енергоспоживання в процесах передачі та розподілу електроенергії та тепла. Це передбачає проведення технічної та технологічної оновлення систем, а також переосмислення існуючих підходів до організації енергопостачання. Важливим аспектом є інтеграція досягнень у галузі локального енергозабезпечення, особливо з акцентом на використанні відновлюваних джерел енергії, та оптимізації споживання енергії [111-113].

Для удосконалення технології низькотемпературного спалювання за допомогою перетворення відходів в тверде паливо, необхідно розглянути існуючі технології виробництва паливних гранул з біомаси. Розглянемо типову схему виробництва паливних гранул (рис. 4.17).

Деревні відходи, такі як колоди та обапіл, транспортуються до дробарки (21) за допомогою конвеєра (22). Після подрібнення, тріска переміщується наступним транспортером (23) до механізованого складу зі змінною висотою підлоги (1).

Матеріал дрібної фракції доставляється на місце за допомогою автомобільного транспорту (або за допомогою навантажувача) і висипається на механізований склад із системою "рухомої підлоги" (1).

Стокери з рухомою підлогою оснащені гідравлічними приводами, які забезпечують їх зворотно-поступальний рух під дією гідравліки. Їхні лопатки, або "крила", виконані у формі клина, завдяки чому під час руху стокера матеріал з регульованою швидкістю подається до ланцюгового (скребкового) транспортера (2). Звідти сировина переміщується до дискового сепаратора (3), де відбувається відділення від сировини таких домішок, як каміння, коріння тощо, які потрапляють у пересувний контейнер (не показаний на схемі). Після сепаратора матеріал самотічно потрапляє до завантажувальної секції установки для сушіння та подрібнення (4).

Також до цього місця надходять продукти згоряння від теплогенератора (5), а холодне атмосферне повітря втягується через трубу для аварійного розпалу (6). Спершу відбувається змішування продуктів горіння з холодним повітрям, причому співвідношення компонентів змішування регулюється в автоматичному режимі, щоб забезпечити необхідну температуру теплоносія.

Далі цей теплоносій поєднується з вологою сировиною та втягується у Сушильно-подрібнювальний агрегат (4), де сировина спершу подрібнюється, а потім сушиться, піднімаючись разом із потоком теплоносія до динамічного класифікатора, розташованого у верхній частині сушильно-подрібнювального агрегату.

Динамічний класифікатор, налаштований з пульта керування (20), пропускає дрібні та сухі частинки сировини, повертаючи назад великі та вологі фракції до ротора агрегату. Процес продовжується до досягнення потрібної вологості та розміру частинок сировини.

Подрібнена та висушена сировина, яку з цього етапу називають борошном, потрапляє до осадового циклону (8) через створене димососом розрядження. У циклоні, завдяки відцентровій силі, борошно осідає та переміщується донизу, тоді як використаний теплоносій виводиться через димохід (19).

З циклону борошно через шлюзовий затвор подається в шнековий або ланцюгової транспортер (9), далі вступає в бункер гранулятора (10). В бункері

встановлено спеціальний механізм, що запобігає ущільненню борошна. Далі, борошно з бункера за допомогою шнекового подавача з можливістю регулювання швидкості подається в міксер (кондиціонер) преса, куди також додається вода (або пар).

У міксері відбувається підготовка продукту до гранулювання шляхом доведення вологості борошна до необхідного рівня. Після кондиціонування, зволожене борошно проходить через сепаратор для видалення феромагнітних домішок і подається в прес-гранулятор (11). В камері пресування гранулятора борошно потрапляє між роторною матрицею і пресувальними валками, де під високим тиском формуються гранули. Виштовхнуті з матриці гранули досягають стаціонарного ножа, де відбувається їх обрізання. Отримані гранули випадають нижче і через манжету корпусу видаляються з преса.

Гранули, що вийшли з преса, через високу температуру і недостатню міцність, переміщуються в охолоджувальну колону (13) за допомогою вертикального конвеєра, або норії (12). У цій колоні повітря протягом вентилятора циклону (16) пропускається через шар гранул, що не тільки сприяє охолодженню гранул, але й видаляє дрібні частинки негранульованої муки у циклон.

Під час охолодження відбувається зниження вологості гранул через випаровування, а також протікають фізико-хімічні процеси, які забезпечують гранулам потрібну міцність, вологість і температуру. По досягненні охолоджувальною колонкою необхідного рівня наповнення, гранули відправляються на сортувальний етап (14), де відокремлюються якісні гранули від дрібних часток.

Гранули видаляються через розвантажувальний отвір і транспортуються до норії для готової продукції (15), тоді як дрібні частинки (крихта) відсасуються у циклон (16) і потім повертаються на повторне гранулювання разом із борошном. За допомогою норії для готової продукції гранули потрапляють у бункер для готової продукції (17), на якому встановлено дозувальний пристрій. Під бункером знаходяться електронні ваги (18) для

зважування, а на опорах бункера розміщені гачки для розміщення великих мішків (біг-бегів). Альтернативно, замість використання біг-бегів можлива упаковка гранул у поліетиленові мішки вагою 15 кг, які укладаються на піддони. Заповнені біг-бегі чи піддони з мішками за допомогою навантажувача або гідравлічного візка переміщуються на склад готової продукції.

Теплогенератор у цій конфігурації може бути заповнений паливом як вручну (через спеціальні дверцята), так і в автоматичному режимі з паливного бункера (7). Автоматичне дозаповнення паливного бункера здійснюється завдяки відведенню частки борошна з осадового циклону (8) через систему пневматичного транспорту (24). Як додаткова опція, паливний бункер може бути заповнений за допомогою додаткового конвеєра зі складу сировини або з окремого паливного складу (які на схемі не представлені).

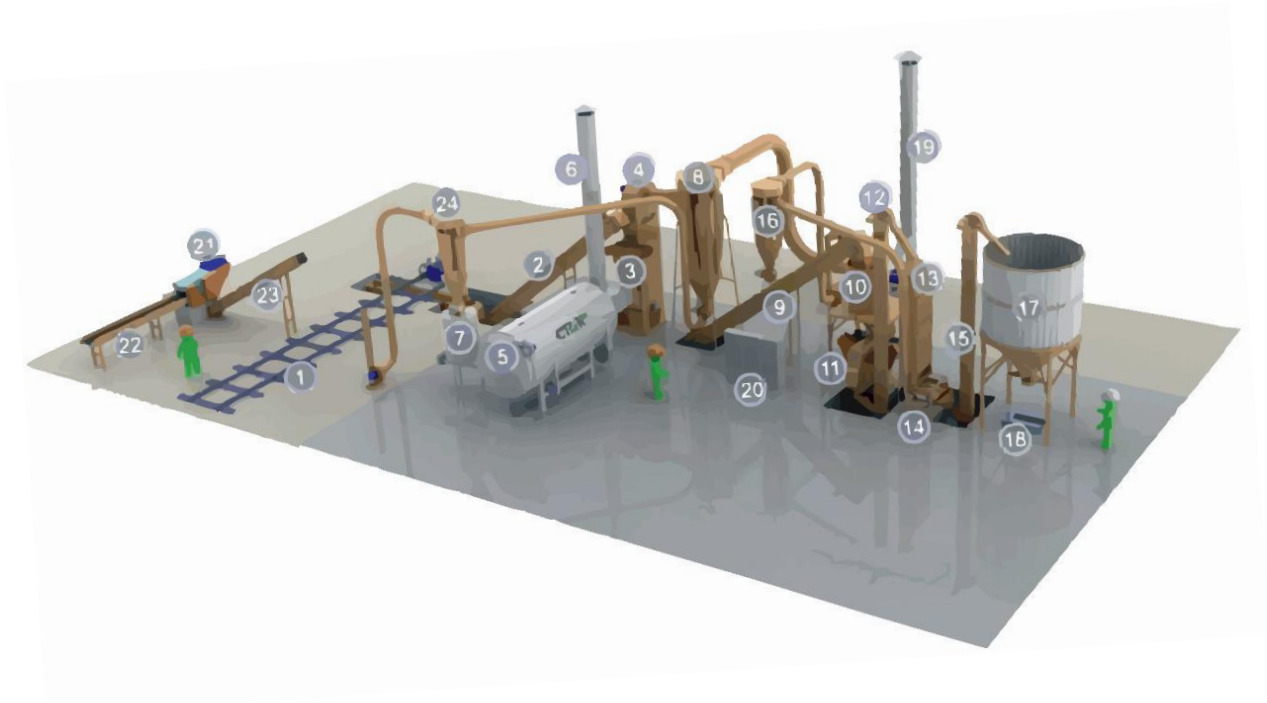


Рисунок 4.17 – Схема типового підприємства з виробництва паливних гранул

Для нашої удосконаленої схеми необхідно додати сортувальні лінії та бункери для зберігання відсортованих відходів. На схемі 4.18 зображено основні етапи, що необхідні для виготовлення паливних композицій.

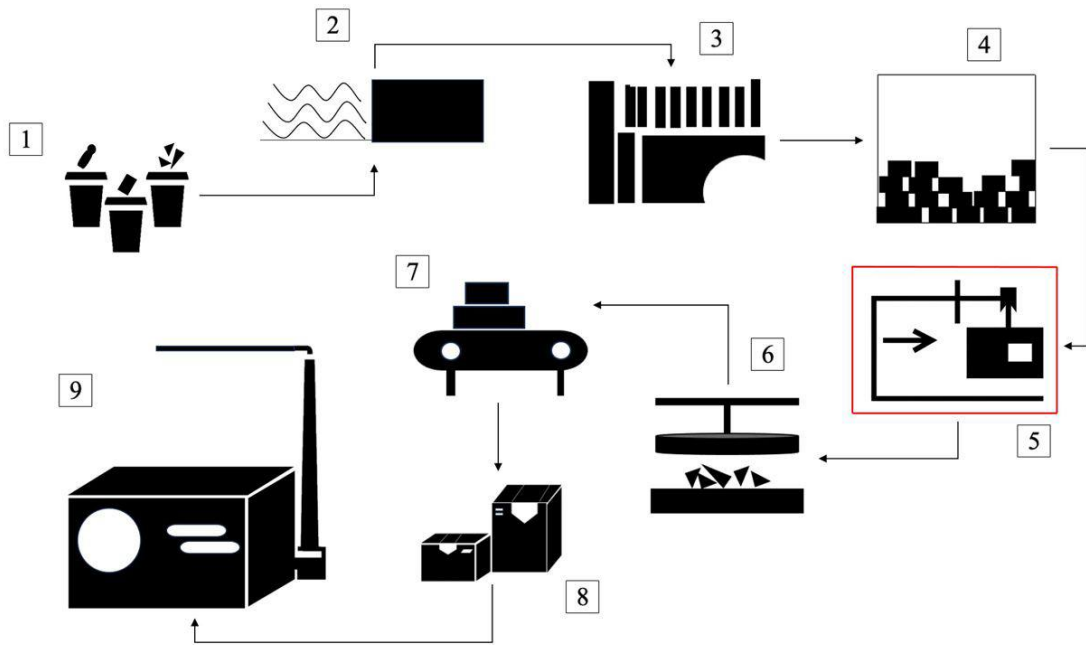


Рисунок 4.18 - Принципова схема функціонування удосконаленої технології переробки відходів на тверде паливо

Вище наведена схема представляє технологічний процес переробки відходів, який організований за етапами з метою оптимізації відновлення ресурсів та мінімізації екологічного впливу. Наведені нижче етапи відображають послідовність та інтеграцію процесів управління відходами:

1. Сортування: Перший критичний етап, на якому відбувається відокремлення відходів на фракції згідно їх фізико-хімічних властивостей. Негорючі матеріали, такі як скло та метал, відсортовуються окремо від горючих (пластик, гума, текстиль, дерево), які підлягають подальшій переробці або відновленню. Інколи, органічні відходи можуть направлятися на компостування, а несортовані горючі відходи можуть іти на високотемпературне спалювання.
2. Сушка: Вологість матеріалів знижується для підвищення ефективності подальших процесів, таких як подрібнення та спалювання. Сушка може проводитися природним шляхом або за допомогою механічних сушильних систем.

3. Подрібнення: Механічний процес, який зменшує розміри матеріалів, підвищуючи однорідність та площу поверхні для наступного хімічного чи фізичного оброблення. Подрібнення є ключовим для ефективності спалювання.
4. Зберігання: Тимчасове зберігання оброблених відходів забезпечує регулювання потоку матеріалів і підтримує безперебійність виробничого процесу.
5. Підготовка паливних композицій: Оптимізація суміші з різних видів горючих матеріалів для створення палива з покращеними характеристиками згорання, таких як вища калорійність та стабільність горіння, при відносній екологічній нейтральності
6. Пресування: Компактування матеріалів підвищує їх щільність, зменшує об'єми для транспортування та полегшує автоматизацію подальших процесів.
7. Перевірка готової продукції: Цей етап включає аналіз та тестування властивостей отриманих матеріалів після їх переробки. Він може включати перевірку на вміст вологи, міцності, щільності, та інших фізичних характеристик для забезпечення їх відповідності до заданих стандартів.
8. Пакування: Після того, як матеріали пройшли контроль якості, вони упаковуються для зберігання або транспортування. Упаковка має захищати матеріали від забруднення, вологи, та інших зовнішніх факторів.
9. Спалювання: Використання отриманої продукції за призначенням. Готова продукція поставляється до підприємств та інших господарств, що використовують тверде паливо.

*Компостування

**Виділення на високотемпературне спалювання

***Відходи-кінцевий аналіз

Примітки вказують на додаткові процеси, пов'язані з вищезазначеними етапами. Зокрема, компостування може бути альтернативним способом обробки біовідходів, а високотемпературне спалювання може використовуватися для відходів, що не пройшли етап сортування.

Висновки до розділу 4

1. Проведено, за допомогою калориметра ІКА С1, визначення енергетичної цінності кожного зразка деревних твердопаливних пелет, х усередненої суміші, а також різних типів відходів та загальної суміші побутових відходів, яка відповідає морфологічному складу, придатному для спалювання, зібраному на комунальному підприємстві "Полігон ТПВ" у селі Рибне.

2. Розроблено метод калькуляції енергетичної цінності сумішей побутових відходів та твердопаливних пелет. Цей метод дозволяє визначити обсяг теплової енергії, який може бути отриманий при спалюванні суміші побутових відходів та пелет за різними пропорціями складових.

3. Сформовано набір нейронних мереж, які надалі були інтегровані в один програмний пакет. Основною категорією для всіх мереж в дослідженні була калорійність. Різноманітні групи даних виступали як неперервні вхідні змінні для різних мереж.

4. Було виконано ряд обчислень та визначено оптимальні співвідношення складових, які можуть забезпечити мінімальні викиди при максимальному значенні калорійності.

За допомогою різних математичних методів показують що оптимальними є суміші склад яких знаходиться в діапазоні 10% пластику, 50% суміші пелет та 40% суміші ТПВ Рибненського полігону.

5. Визначено принципову схему функціонування удосконаленої технології переробки відходів на тверде паливо.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена актуальна науково-прикладна задача в галузі удосконалення методів та технологій переробки побутових відходів термічним способом для одержання відновлювальної енергії та отримано наступні основні результати.

Проведено всебічний аналіз властивостей та потенціалу твердих побутових відходів (пластик, гума, текстиль, біовідходи, дерево, папір і несортований горючий матеріал) як потенційних джерел теплової енергії за допомогою низькотемпературного методи спалювання.

Вперше наведено принципову схему функціонування удосконаленої технології переробки відходів на тверде паливо. Та утворення паливних деревних сумішей з твердими побутовими відходами. Проведено SWOT-аналіз, порівнявши традиційне спалювання з інноваційними техніками термічної обробки. Виявлено, що найбільш обнадійливими методами переробки відходів в Україні є піроліз або газифікація.

Здійснено дослідження властивостей та складу домашніх відходів на полігоні ТПВ. Це дало основу для вдосконалення систем управління відходами та впровадження більш ефективних методів переробки та рециклінгу. Детальний аналіз властивостей відходів дозволив виявити потенційні можливості для їхньої переробки, включно зі спалюванням.

Проведено вивчення енергетичних культур, таких як сільфія, міскантус, топінамбур та свічграс, з метою визначення їх продуктивності та потенціалу як сировини для виробництва паливних гранул. За допомогою калориметра ІКА С1 визначено калорійність різних зразків твердопаливних деревних пелет та їхньої суміші, виявивши, що пелети мають схожий рівень теплотворної здатності.

Досліджено викиди забруднюючих речовин в атмосферу під час спалювання відходів. Аналізовано вміст важких металів у золі після спалювання побутових відходів та твердопаливних пелет.

У рамках наукового дослідження була проведена оцінка зольності різних типів відходів, включаючи пластик, біологічні відходи, гуму, папір, текстиль, деревину, а також деревні пелети різних видів: дуб, бук, хвойні. Було створено діаграму, що наочно демонструє співвідношення між калорійністю та зольністю цих матеріалів, і проведено аналіз отриманих даних про зольність для різних видів відходів.

Вивчення складу хімічних елементів в побутових відходах з полігону села Рибне показало, що хімічний склад залежить від типу відходів і переважно складається з відповідних оксидів. Аналіз хімічного складу золи з деревних пелет підтвердив, що такі пелети є екологічно безпечним паливом, що важливо з огляду на їх властивості.

Дослідження калорійності та зольності різних видів відходів дозволило встановити кореляцію між цими показниками, ключову для оцінки енергетичної цінності та екологічної безпеки відходів. Результати підкреслили необхідність розвитку методів переробки відходів для енергетичних цілей. Було виявлено, що деякі види пелет, зокрема з дуба, бука та хвої, ефективні для виробництва енергії через високу калорійність та низькі рівні викидів, на відміну від інших типів горючих відходів.

Застосовано штучні нейронні мережі для визначення оптимальних концентрацій паливних сумішей. Основними критеріями при визначенні співвідношення суміші – калорійність, екологічність та ціна. Розрахунковим методом пропрацьовано ідеальне співвідношення складових паливних сумішей. Різні типи побутові відходи, мають різну калорійність, за допомогою дослідження виявлено, що гума та пластик є найбільш калорійними синтетичними матеріалами. Проте при спалюванні вони також мають високий рівень викидів небезпечних речовин в навколишнє середовище, тому саме ці компоненти в суміші використовуються в обмеженій кількості.

Розроблено методику для визначення енергетичної цінності сумішей побутових відходів та деревних пелет, що дозволяє оцінити кількість теплової енергії, отриманої в результаті їх спалення за різними пропорціями. Проведено

обчислення для визначення оптимальних пропорцій складових, що забезпечують мінімізацію викидів при максимізації калорійності, виявивши, що найкращі суміші містять 10% пластику, 50% деревних пелет та 40% відходів з Рибненського полігону. Також була розроблена концептуальна схема для вдосконаленої технології переробки відходів у тверде паливо.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Козій, О.І. Термічне знешкодження твердих побутових відходів: європейський досвід [Текст]. / О.І Козій, М.П. Петрук, О.М. Вахула // Комунальне господарство міст - Харків, 2015. - 120(1). - С. 122-125.
2. Аналіз стану сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2022 рік. *Міністерство інфраструктури України*. URL: <https://mtu.gov.ua/news/34323.html>.
3. Magnetic Microstructure of Epitaxial Films of LaGa-Substituted Yttrium Iron Garnet / A. O. Kotsyubynsky et al. *METALLOFIZIKA I NOVEISHIE TEKHNologii*. 2019. Vol. 41, no. 4. P. 529–548. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.04.0529>.
4. Kalogirou E. N. Waste-to-Energy Technologies and Global Applications. Boca Raton, FL : CRC Press, 2018. : CRC Press, 2017. URL: <https://doi.org/10.1201/9781315269061>.
5. Okorskyi V. SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS WITH THE FORMATION AND ACCUMULATION OF HOUSEHOLD WASTE AND THE ROLE OF LOCAL SELF-GOVERNMENT IN THEIR RESOLUTION. *Economy and Society*. 2019. No. 20. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2019-20-66>.
6. М. М. Орфанова, Т. М. Яцишин, Т. А. Бондарчук Аналіз напрямків утилізації гумових відходів / // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. - 2021. - № 1(23). - С. 109-114 URL: <https://dntb.gov.ua/wp-content/uploads/2018/10/%D0%92%D1%96%D0%B4%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B8-IV%D0%BA%D0%B2.2021.pdf>
7. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року / Розпорядження Кабінету Міністрів України. 2017. URL: [https:// zakon.rada.gov.ua/laws/show/820\\$2017\\$%D1%80#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820$2017$%D1%80#Text)

8. Борисовська О.О., Бочарова А.С. Спалювання відходів та його екологічні наслідки. *Двадцята всеукраїнська практично-піз-навальна інтернет-конференція*. 2020. URL: <http://naukam.triada.in.ua/index.php/konferentsiji/50-dvadtsyata-vseukrajinska-praktichno-piznavalna-internet-konferentsiya/459-spalyuvannya-vidkhodiv-ta-jogo-ekologichni-naslidki>
9. Статистичний збірник «Довкілля України» за 2018 рік. Київ : Держстат, 2019. 214 с.]..
10. Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua>
11. Propriétés physicochimiques des systèmes cimentaires composés de chaux et d'additifs minéraux / A. Lefèvre et al. *Revue Française de Génie Civil*. 2003. Vol. 7, no. 2. P. 167–177. URL: <https://doi.org/10.1080/12795119.2003.9692487>.
12. Проблема сміття: від Європи до України - Інститут громадянського суспільства. *Інститут громадянського суспільства*. URL: <https://www.csi.org.ua/news/problema-smittyva-vid-yevropy-do-ukrayiny/>.
13. Екологічні та правові аспекти утилізації твердих побутових відходів / М. П. Петрук, О. І. Козій, О. М. Вахула, Р. А. Яцюк // Наше право. - 2017. - № 3. - С. 178. - URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nashp_2017_3_32
14. Malovanyu M.; Paraniak R., Tymchuk I, Zhuk V., Ablicieva I., Korbut M., Dziurakh Yu., Zhylishchych Yu. 2923. Disposal of pine wood waste by pelleting with sulphate soap binder. *Pollack Periodica*, 288(2023), 151-158. URL: <https://doi.org/10.1556/606.2023.00885>
15. «Кращі з доступних технологій для житлово-комунального господарства України». Керівництво з відбору технологій/Під редакцією С. Єрмілова. – К.: «Поліграф плюс», 2016. – 134 с.: іл. URL: https://global.kawasaki.com/en/industrial_equipment/environment_recycling/waste/heat.html.

16. Stehlik P. Up-to-Date Waste-to-Energy Approach. Cham : Springer International Publishing, 2016. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15467-1>.
17. The Global Food System: Trends, impacts, and solutions. *Metabolic*. URL: https://www.metabolic.nl/publication/global-food-system-an-analysis/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwnv-vBhBdEiwABCYQA1qVqX5FilpKW7gGvUlyxnJXUV7aTmmTDPcyWhskhe40vsIJ7MmbBoClS UQAvD_BwE.
18. Home. *OECD iLibrary*. URL: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/de747aef-en/index.html?itemId=/content/publication/de747aef-en>.
19. Guerrero L. A., Maas G., Hogland W. Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*. 2013. Vol. 33, no. 1. P. 220–232. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>.
20. World Bank Group. Solid Waste Management. *World Bank*. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>.
21. Solid waste management in the world's cities: Water and sanitation in the world's cities / ed. by United Nations Human Settlements Programme. London : Earthscan, 2010.
22. Hettiarachchi H., Meegoda J., Ryu S. Organic Waste Buyback as a Viable Method to Enhance Sustainable Municipal Solid Waste Management in Developing Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15, no. 11. P. 2483. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph15112483>.
23. Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas / N. Scarlat et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 50. P. 1269–1286. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.067>.
24. Abubakar I. R. Household Response to Inadequate Sewerage and Garbage Collection Services in Abuja, Nigeria. *Journal of Environmental and Public*

- Health.* 2017. Vol. 2017. P. 1–11.
URL: <https://doi.org/10.1155/2017/5314840>.
25. Un-Habitat. *Planning Sustainable Cities: Global Report on Human Settlements 2009*. Taylor & Francis Group, 2016.
 26. Abul S. Environmental and health impact of solid waste disposal at Mangwaneni dumpsite in Manzini: Swaziland. *J. Sustain. Dev. Afr.* 2010, Vol. 12, no. 7. P. 64-78.
 27. Evaluating the Efficiency of Municipal Solid Waste Management in China / Q. Yang et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2018. Vol. 15, no. 11. P. 2448.
URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph15112448>.
 28. Study on the baseline data of solid waste management in the Holy City of Makkah during Haj 1427 / H.M. Abdul-Aziz et al. *Environmental Science, History.* 2007.
 29. Kabera T., Nishimwe H. Systems analysis of municipal solid waste management and recycling system in east Africa: benchmarking performance in Kigali city, Rwanda. *E3S Web of Conferences.* 2019. Vol. 80. P. 03004.
URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198003004>.
 30. Abubakar I.R., Aina Y.A. Achieving sustainable cities in Saudi Arabia: Juggling the competing urbanization challenges. *IGI Global: Hershey, PA, USA.* 2016; P. 234–255.
 31. Khan M.S.M., Kaneesamkandi Z., Biodegradable waste to biogas: Renewable energy option for the Kingdom of Saudi Arabia. *Int. J. Innov. Appl. Stud.* 2013. Vol. 4, no. 1. P. 101-113.
 32. Solid Waste Management in Saudi Arabia | EcoMENA. *EcoMENA.*
URL: <https://www.ecomena.org/tag/solid-waste-management-in-saudi-arabia/>.
 33. Digitalization for transformative urbanization, climate change adaptation, and sustainable farming in Africa: trend, opportunities, and challenges / A.-

- L. Balogun et al. *Journal of Integrative Environmental Sciences*. 2022. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1080/1943815x.2022.2033791>.
34. Gazzeh K., Abubakar I. R., Hammad E. Impacts of COVID-19 Pandemic on the Global Flows of People and Goods: Implications on the Dynamics of Urban Systems. *Land*. 2022. Vol. 11, no. 3. P. 429. URL: <https://doi.org/10.3390/land11030429>.
35. Addo I. B., Adei D., Acheampong E. O. Solid Waste Management and Its Health Implications on the Dwellers of Kumasi Metropolis, Ghana. *Current Research Journal of Social Sciences*. 2015. Vol. 7, no. 3. P. 81–93. URL: <https://doi.org/10.19026/crjss.7.5225>.
36. Comply with OECD for responsible business conduct guidelines. *Worldfavor*. URL: https://worldfavor.com/oecd-hrdd/?utm_term=oecd&utm_campaign=Legislations&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=5048802727&hsa_campaign=20471103297&hsa_grp=158283269488&hsa_ad=670540435372&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-297897692308&hsa_kw=oecd&hsa_mt=b&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw-_mvBhDwARIsAA-Q0Q41zGIAw36OjWeuanKjbx-F3pN-t6se5HAJjchFaHobW3jIQyTI4DEaAgRQEALw_wcB
37. Ojok J., Koech M.K., Tole M., Okot-Okumu J. Rate and quantities of household solid waste generated in Kampala City, Uganda. *Sci. J. Environ.* 2012.
38. New World Bank country classifications by income level: 2022-2023. *404 Error - Page Not Found*. URL: <https://blogs.worldbank.org/en/opendata/new-world-bank-country-classifications-income-level-2022-2023>
39. Back Matter: Appendices A through F / S. Kaza et al. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. 2018. P. 185–272. URL: https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0_bm.

40. Zhang D. Q., Tan S. K., Gersberg R. M. Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges. *Journal of Environmental Management*. 2010. Vol. 91, no. 8. P. 1623–1633. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.012>.
41. Hoornweg D., Giannelli N., Managing municipal solid Waste in Latin America and the Caribbean: Integrating the private sector, harnessing incentives. *World Bank, Washington, DC, USA*. 2007.
42. The Waste Management Research Group, Group W. M. R. Water and wastewater treatment in china: a strategic entry report, 2000 (strategic planning series). 2nd ed. Icon Group International, Inc., 2005. 210 p.
43. Abdel-Shafy H. I., Mansour M. S. M. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2018. Vol. 27, no. 4. P. 1275–1290. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>.
44. Environmental impact assessment of converting flexible packaging plastic waste to pyrolysis oil and multi-walled carbon nanotubes / A. Ahamed et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 390. P. 121449. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121449>.
45. Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash / E. Allegrini et al. *Journal of Environmental Management*. 2015. Vol. 151. P. 132–143. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.032>.
46. Assamoi B., Lawryshyn Y. The environmental comparison of landfilling vs. incineration of MSW accounting for waste diversion. *Waste Management*. 2012. Vol. 32, no. 5. P. 1019–1030. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.023>.
47. Ayodele T.R., Ogunjuyigbe A.S.O., Alao M.A. Life cycle assessment of waste-to-energy (WtE) technologies for electricity generation using municipal solid waste in Nigeria. *Appl Energy*. 2017. Vol. 201. P. 200-218. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.097>.

48. Application of bipolar electrochemistry to accelerate dew point corrosion for screening of steel materials for power boilers / D. Bankiewicz et al. *Fuel*. 2020. Vol. 265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116886>.
49. A novel real-time monitoring and control system for waste-to-energy gasification process employing differential temperature profiling of a downdraft gasifier / W. Chan et al. *J. Environ Manag.* 2019 Vol. 15, no. 234. P. 65-74. URL: <https://doi: 10.1016/j.jenvman.2018.12.107>.
50. Analytical assessment of tar generated during gasification of municipal solid waste: distribution of GC–MS detectable tar compounds, undetectable tar residues and inorganic impurities / W. Chan et al. *Fuel*. 2020. Vol. 268. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117348>.
51. Cherubini F., Bargigli S., Ulgiati S. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*. 2009. Vol. 34, no. 12. P. 2116-2123. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.08.023>
52. Life-cycle-assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration / A. Damgaard et al. *Waste Manag.* 2010. Vol. 30. P. 1244-1250. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.025>.
53. Директива 2008/98/ЄС про відходи.
https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08#Text
54. Директива 1999/98/ЄС про захоронення відходів
https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08#Text
55. Директива 2000/76/ ЄС про спалювання відходів
https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08#Text
56. ЗАКОН УКРАЇНИ Про управління відходами
<https://ips.ligazakon.net/document/JI02286H?an=252>
57. Kaur A., Bharti R., Sharma R. Municipal solid waste as a source of energy. *Materials Today: Proceedings.* 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.286>

58. Assessment of the Synergy between Recycling and Thermal Treatments in Municipal Solid Waste Management in Europe / M. Abis et al. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 23. P. 6412. URL: <https://doi.org/10.3390/en13236412>
59. Co-disposal of municipal solid waste incineration fly ash and bottom slag: A novel method of low temperature melting treatment / G. Wong et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. P. 124438. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124438>.
60. Thermochemical conversion of municipal solid waste into energy and hydrogen: a review / R. Nandhini et al. *Environmental Chemistry Letters*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01410-3>.
61. Assessing the environmental impact of waste management: A comparative study of CO₂ emissions with a focus on recycling and incineration / M. C. Unegg et al. *Journal of Cleaner Production*. 2023. P. 137745. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137745>.
62. Assessing the environmental footprint of recycled plastic pellets: a life-cycle assessment perspective / J. Saleem et al. *Environmental technology & innovation*. 2023. Vol. 32. P. 103289. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103289>.
63. Effects of N₂/CO₂ atmosphere on the pyrolysis characteristics for municipal solid waste pellets / C. Yue et al. *Fuel*. 2022. Vol. 315. P. 123233. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123233>.
64. Tran H., Juno E., Arunachalam S. Emissions of wood pelletization and bioenergy use in the United States. *Renewable energy*. 2023. P. 119536. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119536>.
65. Науково-практичні засади кондуктивної калориметрії [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.04 / Воробйов Леонід Йосипович ; НАН України, Ін-т техн. теплофізики НАН України. - Київ, 2018. - 36 с.
66. Atashbar N. Z., Labadie N., Prins C. Modeling and optimization of biomass supply chains: a review and a critical look. *IFAC-PapersOnLine*. 2016.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.742>.

67. Національний форум "Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології" Розроблення та реалізація регіональних Програм поводження з відходами: проблемні питання та кращі практики. Івано-Франківськ : Центра екол. освіти та інформації, 2020. 407 с. URL: https://issuu.com/ecoleague/docs/_____2020
68. Веденіна Ю. Ю., Петрухненко Л. Є., Велькін Б. О. Утилізація твердих побутових відходів як основа сталого економічного розвитку / Вісник Хмельницького Національного Університету. Хмельницький.- 2020. – с.192.
69. Паливо з відходів: українці створили пересувну переробну станцію. *Велика Епоха*. URL: <https://www.epochtimes.com.ua/suspilstvo/palyvo-z-vidhodiv-ukrayinci-stvoryly-peresuvnu-pererobnu-stanciyu-123313>.
70. Systems, decision and control in energy IV / ed. by A. Zaporozhets. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5>.
71. Головне управління статистики в Івано-Франківській області https://ifstat.gov.ua/EX_IN/NS6.HTM
72. Міністерство інфраструктури України. *Міністерство інфраструктури України*. URL: <https://mtu.gov.ua/>.
73. Дослідження відновлення енергії з твердих побутових відходів в ІваноФранківській області шляхом термічної обробки ЕнуMsw, Карпаш М., Яцишин Т. та ін. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу 2020 рік, 58 с.
74. Нормативні акти Івано-Франківської міської ради. *Нормативні акти Івано-Франківської міської ради*. URL: <http://www.namvk.if.ua/prdt/462069/>.

75. Нові правила роботи полігонів в Україні: Міндовкілля розпочинає повторне обговорення документа – Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України – офіційний сайт*. URL: <https://mepr.gov.ua/novi-pravy-la-roboty-poligoniv-v-ukrayini-mindovkilliya-rozpochynaye-povtorne-obgovorennya-dokumenta/>.
76. Myroslav Malovanyu, Roman Paraniak, Ivan Tymchuk, Volodymyr Zhuk, Disposal of wood waste by granulation to produce biofuels Research Square Version 1 posted 11 Oct, 2022 URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2126129/v1>
77. Управління відходами: скільки в Україні утворюється і накопичується сміття. *Слово і Діло*. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2021/08/28/infografika/suspilstvo/upravlinn-ya-vidhodamy-skilky-ukrayini-utvoryuyetsya-nakopychuyetsya-smittya>.
78. UNFCCC and IEA launch new phase of cooperation on tackling climate change - News - IEA. *IEA*. URL: <https://www.iea.org/news/unfccc-and-iea-launch-new-phase-of-cooperation-on-tackling-climate-change>.
79. Marc J. Rogoff, Francois Screve, Chapter 1 - Introduction and overview. *Waste-to-Energy (Second Edition)*. 2011. P. 1-7, URL: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7871-7.10001-2>.
80. Петрук В.Г., Машков О. А., Абідов С. Т., Гура К. Ю. Методологія інтегрованого управління екологічною безпекою природоохоронних систем // Екологічні науки, К.: ДЕАПОУ, Вип. № 35, 2021. С. 153-161 URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2018/2/2-21.pdf>
81. Чи потрібні Україні сміттєспалювальні заводи?. *Всі комунальні платежі Вінниці!*. URL: <https://pay.vn.ua/articles/1114>.
82. Як сміттєспалювальний завод у Відні став туристичною принадою. *Платформа розвитку міст*. URL: <http://urbanua.org/dosvid/zakordonni-pryklady/294>.

83. L.I. Chelyadyn, U.D. Marushchak, P.V. Novosad, G.M. Hrytsuliak, V.S. Ribun, V.L. N̄helyadyn Transformation of Technogenic Waste Based on Water Treatment Sludge into Granulated Fertilizer // *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2022, No. 4, pp. 92-101 DOI: 10.32434/0321-4095-2022-143-4-92-101
84. Планування міжмуніципальної системи інтегрованого поводження з твердими побутовими відходами: методичний посібник /А. М. Артов, В. Є. Сороковський; за заг. ред. В. Є. Сороковського. – К.: Швейцарсько-український проект «Підтримка децентралізації в Україні»DESPRO, 2017. – 104 с. ISBN 978-617-7373-67-3
85. Karpash M., Voronych A., Yatsysyn T., Orfanova M. Analysis of the system of municipal solid waste management Ivano-Frankivsk region (Ukraine). *Scientific Bulletin Series D: Mining, Mineral Processing, Non-Ferrous Metallurgy, Geology & Environmental Engineering*. 2019. Vol XXXIII. Issue 2. pp.39-47.
URL: <https://www.proquest.com/docview/2436884500?sourcetype=Scholarly%20Journals>
86. В. Г.Петрук, В. А. Іщенко, Р. В. Петрук Оптимізація системи інтегрованого управління твердими побутовими відходами у Вінницькій області. Вінниця : ВНТУ, 2023. – 111 с. ISBN 978-966-641-940-1
87. Young G. C. *Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes: Economic, Technical, and Renewable Comparisons*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2010. 396 p.
88. Kalinci Y., Dincer I. 5.3 Waste Energy Management. *Comprehensive Energy Systems*. 2018. P. 91–133. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809597-3.00510-1>.
89. Lausanne / switzerland. *Hitachi Zosen Inova*. URL: <https://www.hz-inova.com/wiki/lausanne-switzerland/>.
90. Korbut Mariia, Malovanyu Myroslav, Davydova Irina, Grechanik Ruslan, Tymchuk Ivan, Popovych Olena Assessment of the Condition of Pine

- Plantations in the Area of Influence of Municipal Waste Landfills on the Example of the Zhytomyr Landfill, Ukraine Ecological Engineering & Environmental Technology, 22(5), 40–46. DOI 10.12912/27197050/139411
91. Івано-Франківська обласна державна адміністрація - Екологічні паспорти Івано-Франківської області. *Головна | Івано-Франківська обласна державна адміністрація.*
URL: <https://www.if.gov.ua/dovkillya/ekologichni-pasporti-ivano-frankivskoyi-oblasti>.
 92. У Рибному горіло сміттєзвалище. *Суспільне | Новини.*
URL: <https://suspilne.media/241374-u-ribnomu-na-ivano-frankivsini-gorilo-smittezvalise/>.
 93. Л. І. Челядин, В. С. Рібун, В. Л. Челядин Технологічні та екологічні аспекти удосконалення способу отримання біопалив з рослинних олій // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування : науково-техн. журнал / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (ІФНТУНГ) – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, No 2 (22). – 2020. – с.83-91.
 94. Орфанова М.М. Проблема управління та поводження з відходами у Карпатському регіоні. Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2019. Вип. 31. С. 130-138. URL: https://journals.urau.ua/ludina_dov/article/view/188555
 95. Опис- С 1 Package 3/10. ІКА. URL: <https://www.ika.com/ru/Products-LabEq/Calorimeters-pg330/C-1-Package-310-10002414/>.
 96. Екологічний моніторинг довкілля – Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України – офіційний сайт.*
URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamku/ekologichnyj-monitoring/ekologichnyj-monitoring-dovkillya>.
 97. Rojas R., Feldman J. Neural networks: a systematic introduction. Springer London, Limited, 2013.

98. Haykin S. Neural networks and learning machines. Pearson Education, Limited, 2009. 937 p.
99. Rezension von Frank Winde zu: Schnug, E., S. Haneklaus, F. Knolle, U. Hundhausen, F. Jacobs, M. Birke, 2017: Elementzusammensetzung deutscher Brunnenwässer: Teil 1 - Bedeutung der geologischen Herkunft. *Journal für Kulturpflanzen* 69 (12), 393-401, DOI: 10. Verlag Eugen Ulmer, 2017. URL: <https://doi.org/10.1399/jfk.2017.12.01.r1>.
100. Feng J., Lu S. Performance Analysis of Various Activation Functions in Artificial Neural Networks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1237. P. 022030. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1237/2/022030>.
101. Gjorgieva Ackova D. Heavy metals and their general toxicity for plants. *Plant Science Today*. 2018. Vol. 5, no. 1. P. 14–18. URL: <https://doi.org/10.14719/pst.2018.5.1.355>.
102. Nowak B., Aschenbrenner P., Winter F. Heavy metal removal from sewage sludge ash and municipal solid waste fly ash – A comparison. *Fuel Processing Technology*. 2013. Vol. 105. P. 195–201. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.06.027>.
103. Lopushniak V. I., Hrytsuliak H. M. The intensity of the heavy metals by topinambur in the conditions of the oil-polluted areas. *Iraqi journal of agricultural sciences*. 2021. Vol. 52, no. 6. P. 1334–1345. URL: <https://doi.org/10.36103/ijas.v52i6.1473>.
104. The content of heavy metal ions in ash from waste incinerated in domestic furnaces. *Archives of environmental protection*. 2023. URL: <https://doi.org/10.24425/aep.2020.133476>.
105. Spotfire Data Science: Powering Enterprise-Level Analytics & Collaboration. *Spotfire*. URL: <https://www.spotfire.com/products/data-science>.
106. JetBrains. Resources - IntelliJ IDEA. *JetBrains*. URL: <https://www.jetbrains.com/idea/documentation/>.

107. Oracle | cloud applications and cloud platform. *Oracle | Cloud Applications and Cloud Platform*. URL: <https://www.oracle.com/>.
108. 1 JavaFX Overview (Release 8). *Moved*. URL: <https://docs.oracle.com/javase/8/javafx/get-started-tutorial/jfx-overview.htm>.
109. JFoenix. *Page not found · GitHub Pages*. URL: <https://stars-one.github.io/JFoenix-Website/documentation.html>.
110. Experimental studies of burning plant pellets in a domestic boiler / B. Basok et al. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*. 2021. Vol. 37. P. 13–23. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.37.13-23>.
111. Smical I., Orfanova M. The WEEE management and its influence on environmental and human health. Case study: Maramures county, Romania. *Carpathian Journal of electrical Engineering*. 2020. Volume 14, Number 1. pp. 73-85. URL: <http://cee.cunbm.utcluj.ro/wp-content/uploads/CJEE20206.pdf>
112. Петрук В.Г., Гура К. Ю. Аналіз сучасних тенденцій декарбонізації та екомодернізації енергетики України і світу // Вісник Вінницького політехнічного інституту, Вінниця : ВНТУ, 2021. – С. 19-26 URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-19-26>
113. Malovanyu M.; Paraniak R., Tymchuk I, Zhuk V., Ablieieva I., Korbut M., Dziurakh Yu., Zhylishchych Yu. 2023. Disposal of pine wood waste by pelleting with sulphate soap binder. *Pollack Periodica*, 288(2023), 151-158. URL: <https://doi.org/10.1556/606.2023.00885>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації

1. Огляд сучасного стану сталих технологій для енергетичної утилізації твердих побутових відходів / **В. Чупа** та ін. *Ecological safety and balanced use of resources*. 2021. № 1(23). С. 115–123. URL: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-1\(23\)-115-123](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-1(23)-115-123) (**наукове фахове видання України**) (Особистий внесок – проведено збір та аналіз існуючих технологій у сфері термічної переробки побутових відходів).
2. **Чупа В. М.**, Адаменко Я. О., Чупа К. О. Дослідження термічного потенціалу різноманітних сумішей твердих побутових відходів до твердопаливних пелет. *Ecological safety and balanced use of resources*. 2023. № 2(26). С. 149–154. URL: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2\(26\)-149-154](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2(26)-149-154) (**наукове фахове видання України**) (Особистий внесок – на підставі власних лабораторних досліджень проведено порівняльний аналіз теплотворної здатності побутових відходів, твердопаливних пелет та їх композицій).
3. **Чупа В. М.**, Адаменко Я. О. Дослідження рівня зольності та вмісту хімічних елементів в золі різних видів твердих побутових відходів та твердопаливних пелет. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2023. № 1(27). С. 92–98. URL: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2023-1\(27\)-92-98](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2023-1(27)-92-98) (Особистий внесок – на підставі власних лабораторних досліджень проведено аналіз показників зольності твердопаливних пелет та побутових відходів, а також досліджено рівні вмісту хімічних елементів, зокрема токсичних в їх золі).
4. **Chupa, V., & Zhovtulia, L.** (2023). Study of emissions into the atmosphere of pellets and solid waste. *Environmental safety and balanced resource use,*

- (2(28). URL: <https://ebzr.nung.edu.ua/index.php/ebzr/index> (**наукове фахове видання України**) (Особистий внесок – на підставі власних лабораторних досліджень проведено аналіз викидів в атмосферне повітря під час спалювання побутових відходів та твердопаливних пелет).
5. Statistical analysis of the productivity of phytocoenoses of energy cultures due to implementation of wastewater sediment on aluvisols of Ukraine / **V. Chupa** et al. Journal of ecological engineering. 2023. Vol. 24, no. 9. P. 192–201. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/169161> (Q3) (**індексується в Scopus**) (Особистий внесок – проведено польові дослідження та підібрано оптимальні зразки енергетичних культур для подальших досліджень).
6. Comparative assessment of the content of heavy metals in the ash of solid fuel pellets and different types of sorted and unsorted solid domestic waste / **V. Chupa** et al. Ecological engineering & environmental technology. 2024. No. 25(5). URL: <http://www.ecoeet.com/Comparative-Assessment-of-the-Content-Of-Heavy-Metals-in-The-Ash-of-Solid-Fuel-Pellets,184236,0,2.html> (Q3) (**індексується в Scopus**) (Особистий внесок – на підставі власних лабораторних досліджень проведено порівняльний аналіз вмісту важких металів у золі твердопаливних пелет побутових відходів).

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. **Chupa V. M.**, Hrytsuliak H., Fedorko N. B. Overview of the current state of sustainable technologies for energy utilization of solid waste. *Агрохімічні ресурси та управління біопродуктивністю агроландшафтів* : : Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції., Київ, 23–25 листоп. 2021. Київ, 2021. P. 75–85.

8. Pollution of water resources / **V. M. Chupa** et al. Modern science: innovations and prospects : Proceedings of III International Scientific and Practical Conference, Stockholm, 5–7 December 2021. Stockholm, 2021. P. 197–204. (Провів дослідження, обробив отримані результати)
9. Прогнозування продуктивності *panicum virgatum* L (switchgrass) за допомогою комп'ютерної програми / **В. М. Чупа** та ін. *Science, innovations and education: problems and prospects* : Proceedings of V International Scientific and Practical Conference, м. Токуо, 8–10 лют. 2021 р. Токуо, 2021. С. 22–34. (Зібрав інформацію, провів дослідження, сформулював висновки).
10. **Чупа В. М.**, Адаменко Я. О. Дослідження морфологічного складу ТПВ для відновлення енергії у Івано-Франківській області (збір та підготовка зразків ТПВ). *Актуальні питання сталого науковотехнічного та соціально-економічного розвитку регіонів України* : І всеукр. науково-практ. конф. здобувачів вищ. освіти, аспірантів та молодих вч., м. Запоріжжя, 19–21 жовт. 2021 р. Запоріжжя, 2021. С. 509–510. (Зібрав інформацію та обробив її, сформулював висновки)
11. **Чупа В. М.**, Чупа К. О., Адаменко Я. О. Оцінка рівня зольності твердих побутових відходів та твердопаливних пелет. *Адаптація до глобальних змін та викликів: нові форми економіки, ресурсоефективні технології, захист довкілля* : Всеукр. науково-практ. конф. здобувачів і молодих вчен., м. Івано-Франківськ, 18 трав. 2023 р. Івано-Франківськ, 2023. С. 349–350. (Провів дослідження, обробив отримані результати, сформулював висновки)
12. Study of the calorie value of solid domestic waste mixtures / **V. M. Chupa** et al. *The research process in science and the implementation of results* : Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference, Maribor, 24–25 April 2023. Maribor, 2023. P. 95–102. (Провів дослідження, обробив отримані результати, сформулював висновки)

13. **Чупа В.,** Грицик А. Рівні термічного потенціалу твердопаливних пелет та твердих побутових відходів. *Молодіжний екогеофорум – 2023* : Регіон. конф., м. Івано-Франківськ, 23–24 листоп. 2023 р. Івано-Франківськ, 2023. С. 84–85. (Провів дослідження, обробив отримані результати, сформулював висновки)

ДОДАТОК Б

Таблиця Б 1

Утворення відходів в Івано-Франківській області

Назва оператора ТПВ	Кі-сть населених пунктів, що обслуговуються	Чисельність населення, яке обслуговується	Назва звалища	Тип збору ТПВ	Місце звалища ТПВ	Утворення відходів, т / рік
1	2	3	4	5	6	7
«Полігон ТПВ»	* населені пункти Івано- Франківської міської ради * 4 райони	752 147	Полігон Рибне	* Роздільний збір (папір, картон, пластик, скло, метал) * Змішані побутові відходи	12 км від міста Івано-Франківськ біля села Рибне	94429,26
Старобогородчанська сільська рада об'єднаної територіальної громади	1 район	69 916	Сміттєзвалище село Богородчани урочище "Мочари" D 5	Змішані побутові відходи	Богородчанський район, Старобогородчанка об'єднана територіальна громада, с. Скобичівка, урочище Мочари	5 180
Старомартинівська сільська рада	19 населених пунктів	28 997	Сміттєзвалище	Змішані побутові відходи	Старомартинівська сільська рада (між с. Німшин і с. Різдово)	39398,13
Городенківська міська рада	2 населених пунктів	11 605	Сміттєзвалище урочище «Деренівка»	Змішані побутові відходи	Городенківщина, село Котиківка, урочище Деренівка	2 630
Долинська міська рада	1 район	69 473	Полігон для міста Долина на землях Рахінського лісництва. D 1, D 5	Змішані побутові відходи	10 км на північний схід від міста Долина на землях Рахінського лісництва	11 709
ТОВ "Карпатнефтехім"	1 організація	2 602	Полігон твердих технологічних та побутових відходів D 5	Змішані побутові відходи	2,1 км на північ від села Кропивник Калуського району	234,813

Продовження табл. Б 1

1	2	3	4	5	6	7
Калуська міська рада	12 населених пунктів	126 123	Полігон твердих побутових відходів у Калуші поблизу Височанки-Залісся	Роздільний збір (папір, пластик, скло, метал) * Змішані побутові відходи	Височанка-Заліський район у лісі урочища Забаня. Відстань від міста Калуш становить 5,15 км на північний схід	29129,35
Коломийська міська рада	1 місто	61 210	Звалище у Коломиї на вулиці Кривоноса	Змішані побутові відходи	у східному передмісті Коломиї (вулиця Кривоноса) на відстані 500 м від міста	8164,2
Комунальне підприємство «Надвірнакомун-сервіс»	1 місто	22 281	Звалище в урочищі "Кар'єр" для міста Надвірна	Змішані побутові відходи	південно-західне передмістя Надвірної, 250 м на південь від Пнівського замку	3928,093
Рогатинська міська рада	1 район	34 806	Сміттєзвалище	Змішані побутові відходи	Рогатинський район (с. Залужжя)	2779,838
Комунальне підприємство Брошнів-Осадської сільської ради	1 район	10 102	Сміттєзвалище	Змішані побутові відходи	Смт Брошнів-Осада	794,3065
Рожнятівська сільська рада	1 район	62 585	Сміттєзвалище	Змішані побутові відходи	село Рожнятів, урочище Мочар	970
Снятинська міська рада	1 район	65 008	Полігон твердих побутових відходів та сільськогосподарськ их відходів	Змішані побутові відходи	урочище "Звалище" на території Снятинської міської ради	1322
Тлумачька міська рада	1 район	18 291	Сміттєзвалище	Змішані побутові відходи	Тлумач, урочище «Гіракова Яма»	1554,022
ПрАТ «Шкірянук»	1 район	21 468	Полігон твердих побутових відходів	Змішані побутові відходи	Урочище «Криве» Долинського міжколективного лісництва на території Болехівської міської ради	2809
			для міста Болехів в урочищі "Криве"			

Закінчення табл. Б 1

1	2	3	4	5	6	7
Криворівнянська сільська рада	1 район	30224	Верховинський комбінат комунальних підприємств	Змішані побутові відходи	Верховинський район, Криворівнянська сільська рада, урочище «Бережниця»	1490,3
Печеніжинський комбінат комунальних підприємств	1 район	5313	Печеніжинський комбінат комунальних підприємств	Змішані побутові відходи	Село Печеніжин Коломийського району	193,075
Долинське виробниче управління водопровідно-каналізаційного господарства	1 район (частина Долини)	-	Долинське виробниче управління водопровідно-каналізаційного господарства	Змішані побутові відходи	за межами села Тростянець Долинського району	1113,71

ДОДАТОК Г



Рисунок Г 1 – Динаміка зміни «Полігону ТПВ» 2004 – 2005 – 2006 – 2009 – 2011 рр. відповідно



Рисунок Г 2 – Динаміка зміни «Полігону ТПВ» 2012 – 2013 – 2014 – 2015 – 2016 рр. відповідно



Рисунок Г 3 – Динаміка зміни «Полігону ТПВ» 2017 – 2018 – 2019 – 2022 рр. відповідно

ДОДАТОК Г

BRIT

Громадська організація
«Бюро розвитку, інновацій та технологій»
(зареєстровано 20.02.2012)
вул.Микитинецька, 5а (офіс 213)
м.Івано-Франківськ, Україна 76002
+38 0342 50 47 08
ira.darvai@hotmail.com

19 лютого 2024 року № 021/24
На _____ № _____

Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу

Довідка з місця роботи

Цим листом засвідчуємо, що аспірант спеціальності 101 - Екологія Чупа Володимир (21.01.97 р.н.) працював в нашій організації в декількох проектах:

1. Технічний експерт проєкту 2SOFT/1.2/63 - „RO-UA Partnership for Climate Change Mitigation”
2. Експерт проєкту HUSKROUA/1702/6.1/0075 - Cross-border Network of Energy Sustainable Universities (NET4SENERGY)

Володимир Чупа надзвичайно відповідально ставиться до своїх обов'язків і здатний вирішувати навіть найскладніші задачі. Володимир продемонстрував відмінні комунікативні навички та вміння працювати в команді і створювати чудовий і плідний робочий клімат в колективі.

З повагою

Керівник ГО « Бюро Розвитку, Інновацій та Технологій »

Голова правління



/ Ірина ДАРВАЙ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

НАКАЗ

м. Івано-Франківськ

12 листопада 2019р.

№ 296

*Щодо створення групи
виконання проекту*

З метою належної організації виконання проекту проекту технічної допомоги Європейського Союзу «Відновлення енергії з твердих побутових відходів з використанням технологій теплового перетворення в транскордонному регіоні - ЕруMSW» №HUSKROUA/1702/ 6.1/0015, де партнером є університет,

НАКАЗУЮ:

1. Утворити робочу групу з виконання даного проекту на період з 1.11.2019 по 31.10.2020 у складі :
 - 1.1. Керівник проекту від ІФНТУНГ – проректор з НІР, проф. Карпаш Максим Олегович
 - 1.2. Лідер проектної групи – доц. каф. КСМ, директор ЦМС, доц. Воронич Артур Романович
 - 1.3. Менеджер з комунікацій – провідний фахівець із забезпечення зв'язків зі ЗМІ ВІЗГ, Вархов Галина Василівна
 - 1.4. Фінансовий менеджер - провідний фахівець НДНГЕіЕ(сумісник), Прусак Лілія Ігорівна
 - 1.5. Експерт проекту - зав. каф. ЕМТД, проф. Райтер Петро Миколайович
 - 1.6. Експерт проекту – доц. каф. ЕМТД, доц. Яворський Андрій Вікторович
 - 1.7. Експерт проекту - доц. каф. екології, доц. Яшини Теодозія Михайлівна
 - 1.8. Експерт з якості проекту - завідувач лабораторіями кафедри ЕМТД, Жовтуля Любомир Ярославович.
 - 1.9. Лаборант проекту - ст. каф. екології, Чуна Володимир Михайлович
2. Контроль за виконанням наказу залишаю за собою.

Ректор

Крижанівський С. І.

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
Чуши Володимира Михайловича
на тему «Удосконалення методів та технологій переробки відходів для
відновлювальної енергії»,
представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 101-Екологія

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційної роботи Чуши В.М., у вигляді застосунку для розрахунку одержуваних характеристик калорійності, викидів в атмосферне повітря (SO_x , NO_x , SO_2 , NO_2 , CO та пилю $PM_{2.5}$, PM_{10}) та зольності під час низькотемпературної обробки паливної суміші з використанням побутових відходів та біопалива в залежності від їх компонентного складу впроваджені в роботу відділу математичного та економетричного моделювання Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України (далі – Інститут) і використовуються при виконанні науково-дослідної роботи «Розвинення методів та засобів моніторингових досліджень щодо викидів парникових газів в енергетичному секторі України» (№ ДР 0123U100770, 2023-2025 рр., далі – НДР).

Дійсний акт не є підставою для отримання премій та інших винагород з фондів Інституту.

Керівник НДР, заступник директора
з науково-організаційної роботи
Інституту проблем моделювання в енергетиці
ім. Г.С. Пухова НАН України
д.т.н., с.п.с.



Володимир АРТЕМЧУК

15 січня 2024 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи
Івано-Франківського
національного технічного
університету нафти і газупроф.  Кондрат О.Р.

«14» лютого 2024 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження
аспіранта кафедри екології Чупи Володимира Михайловича

Ми, що нижче підписалися, комісія у складі:

Голова - к.с.-г.н., доцент, в.о. завідувача кафедри «Технології захисту
навколишнього середовища та безпеки праці» Грицуляк Г. М.;

члени комісії:


Семчук Я.М. – д.т.н, професор кафедри «Технології захисту
навколишнього середовища та безпеки праці»;Кривенко Г.М. – к.т.н, доцент кафедри «Технології захисту
навколишнього середовища та безпеки праці»;Лялюк-Вітер Г.Д. – к.б.н, доцент кафедри «Технології захисту
навколишнього середовища та безпеки праці».Склали цей акт про те, що результати наукових дисертаційних
досліджень аспіранта кафедри екології Чупи Володимира Михайловича
використовуються під час підготовки фахівців за спеціальністю 183 –
Технології захисту навколишнього середовища, а саме:

- ключова концепція дисертаційної роботи лягла в основу дисципліни «Енергетичний потенціал ТПВ»;
- підходи низькотемпературного відновлення енергії з побутових відходів при викладанні дисципліни «Енергетика майбутнього».

Директор інституту НГІ



Витязь О. Ю.

Голова комісії:
к.с.-г.н., доцент

Грицуляк Г. М.

Члени комісії:
д.т.н., професор

Семчук Я.М.

к.т.н., доцент

Кривенко Г.М.

к.б.н., доцент



Лялюк-Вітер Г.Д.



УНІВЕРСИТЕТ КОРОЛЯ ДАНИЛА
KING DANYLO UNIVERSITY

76018, м. Івано-Франківськ, вул. Є. Коновальця, 35. тел. +38(0342)77-18-45, 068 755 7575, 099 755 7575
35 Konovaltsia St., Ivano-Frankivsk 76018, Ukraine, tel. +38(0342)77-18-45, 068 755 7575, 099 755 7575
e-mail: university@ukd.edu.ua. Офіційна сторінка - ukd.edu.ua

Вих. № 3300

«16» лютого 2024 р.

Довідка

Видана про те, що **Чупа Володимир Михайлович** у період з 01 вересня по 31 грудня 2023 року був залучений як коротко-терміновий експерт проекту Innovation Laboratories for Climate Actions (ILCA) № 220194, який фінансується ЄС у рамках EIT NEI Initiative.

Довідка видана для подання за місцем вимоги.

Перший проректор



Михайло КОСЬМІЙ



Виконавець:
Ірина АНДРУСИШИН
Тел.: 77-18-45