

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

ЛИСЮК ГАННА ПЕТРІВНА

УДК 681.516.7

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АСК ТЕРМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ ТПВ ДЛЯ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ НА ОСНОВІ
СОРТУВАННЯ**

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Г. П. Лисюк

Науковий керівник Давидов В.О. кандидат технічних наук, доцент

Одеса – 2025

АНОТАЦІЯ

Лисюк Г. П. Моделі та методи АСК термічної деструкції ТПВ для забезпечення екологічних показників на основі сортування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Національний університет «Одеська політехніка» МОН України, Одеса, 2025.

Дисертаційна робота присвячена розробці та вдосконаленню моделей і методів автоматизованих систем керування (АСК) технологічними процесами піролізу та спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) на основі автоматизованого сортування ТПВ за хімічним складом для забезпечення ефективного керування їх термічною деструкцією, підвищення енергоефективності технологій утилізації та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. У роботі враховуються вимоги екологічних регламентів, включаючи контроль утворення шкідливих викидів, таких як кислі гази.

У першому розділі «Моделі та методи АСК термічною деструкцією ТПВ» одержано такі результати:

– Проведено аналіз методів переробки ТПВ показав, що серед усіх застосовуваних технологій найвищу ефективність демонструє термічна деструкція. Основні переваги цієї технології включають ефективне знешкодження відходів, повне знищення патогенної мікрофлори, значне зменшення обсягу відходів за масою та використання їх енергетичного потенціалу. Крім того, термічна деструкція відповідає вимогам бізнес-технологій, забезпечуючи виробництво максимальної кількості цінного кінцевого продукту та мінімальні викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище.

– Проведено аналіз моделей та методів автоматизації технологічних процесів термічної деструкції ТПВ показав, що для підвищення ефективності

з обов'язковим дотриманням екологічних норм необхідні дослідження в галузі автоматизації сортування ТПВ за хімічним складом, з обов'язковим виділенням груп, що утворюють кислі гази. Властивість ідентичності бруто формул вихідної речовини та продуктів реакцій може стати основою методу визначення складу вуглеводневих речовин при сортуванні ТПВ на основі термохімічної переробки досліджуваної порції сировини.

– Встановлено, що сортування ТПВ через ідентифікацію та класифікацію сировини із заданими характеристиками дозволить провести обробку промислових обсягів ТПВ.

– Виявлено необхідність формулювання критерію прийняття рішення щодо вибору максимально ефективного та екологічно чистого методу термічної деструкції та розробки для нього структури технічних засобів.

У другому розділі «Модель і метод автоматизованого сортування для подальшої переробки методами термічної деструкції» одержано наступні результати:

– Розроблено імітаційну модель різних груп ТПВ, представлену у вигляді таблиці бруто-формул можливих сполук, з яких утворюються обсяги ТПВ, яка дозволить реалізувати спосіб класифікації при ідентифікації проб твердих побутових відходів з виділенням груп, що утворюють кислі гази.

– Розроблено метод сортування ТПВ, який дозволяє забезпечити подальшу переробку кожної групи з максимальною ефективністю та дотриманням екологічних показників. В основу методу покладено: технологічний спосіб проведення сортування; метод сортування сировини, в який інтегровано вимірювальні пристрої для забезпечення заданих характеристик ідентифікації за класифікаційними ознаками імітаційної моделі; принцип застосування вимірювальних пристроїв залежно від типу задачі ідентифікації за якісним або кількісним показником.

– Розроблено імітаційну модель процесу очищення отриманих вуглецево-водневих газів із класифікованих ТПВ, що включають компоненти, що утворюють кислі гази, з дотриманням екологічних стандартів.

Запропоновано формули оцінки показника ефективності та оцінки питомих витрат термічної деструкції різних груп відсортованих ТПВ для подальшого формування критерію вибору між способами термічної деструкції: спалювання ТПВ в повітрі або піролізу з отриманням синтез-газу.

– Сформульовано правило прийняття рішення по вибору способу переробки ТПВ з дотриманням екологічних стандартів та визначення відповідної структури технічних засобів на основі розробленого методу розрахунку витрат, що враховує оцінки показника ефективності та питомих витрат термічної деструкції різних груп відсортованих ТПВ.

– Розроблено комплексну технологічну схему методів термічної деструкції ТПВ, яка забезпечує дотримання екологічних норм на викиди до навколишнього природного середовища при використанні вторинних енергетичних ресурсів, отриманих з ТПВ.

У третьому розділі «Метод керування процесом піролізу ТПВ змінного складу та вологості на основі нечіткої логіки» виконано наступне:

– Розглянуто особливості роботи та основні завдання керування узагальненою піролізною установкою, яка використовується для термічної деструкції ТПВ.

– Розроблено метод нечіткого керування процесом піролізу твердих побутових відходів змінного складу та вологості, який забезпечує правильне автоматизоване керування піролізною установкою з визначенням оптимального співвідношення витрати повітря/ТПВ, що дозволяє забезпечити ефективність процесу термічної деструкції та вирішувати завдання стабілізації таких взаємопов'язаних керованих параметрів процесу, як температура піролізу та значення рівня в газгольдері в перехідних режимах.

– Розроблено структуру АСК піролізною установкою для реалізації запропонованого методу на основі нечіткої логіки.

– Розроблено нечітку підсистему типу Такагі-Сугено визначення оптимальних параметрів процесу піролізу, яка має п'ять вхідних змінних-відсотковий вміст типів суміші, вологість ТПВ і дві вихідні змінні: питомий

коефіцієнт K_α ; температура в реакторі T_s . Питомий коефіцієнт K_α визначається таким чином, щоб забезпечити максимально можливе значення теплотворної здатності одержуваного піролізного газу та найбільшу температуру T_s в реакторі для інтенсифікації процесу піролізу в режимі реального часу.

– Досліджено ефективність методу нечіткого керування процесом піролізу ТПВ змінного складу. Отримані результати комп'ютерного моделювання підтверджують високу ефективність розробленої системи та методу нечіткого керування, що дозволяє вирішити завдання автоматизованого керування піролізною установкою в умовах змінного складу ТПВ та вологості.

У четвертому розділі «Синтез АСК тепловим навантаженням барабанного котла при спалюванні ТПВ» виконано наступне:

– Розглянуто технологію утилізації твердих побутових відходів в установках, що генерують теплову енергію. Обґрунтовано структуру устаткування, що експлуатується при змінному складі палива, а саме ТПВ. Проведено аналіз методів керування навантаженням парових котлів при збуреннях складом ТПВ. При цьому в якості об'єкта керування для подальшого дослідження обрано котел обладнаний топкою з циркулюючим киплячим шаром. Використання ЦКШ дозволяє вирішити задачу регулювання температури шару з метою зменшення викидів шкідливих сполук сірки та хлору.

– Проведено декомпозицію установки з виділенням характерних ділянок: топки ЦКШ; винесеного теплообміннику; теплообмінних поверхонь, що нагрівають теплоносій; процес поглинання сполук сірки вапном. Синтезовано математичну модель, яка поєднує окремі математичні ділянки.

– Синтезовано АСК установкою. При цьому означені регульовані технологічні змінні, керуючі впливи. Виділено чотири основних регулятори, а саме: потужність, температури шару, економічність та викиди шкідливих речовин. Було прийняте рішення відмовитись від введення в регулятор потужності сигналу про теплотворну здатність палива у вигляді ТПВ, оскільки

різкі зміни його витрат можуть призвести до аварійних ситуацій. І навпаки, введення сигналу про теоретичну кількість повітря дозволило збільшити точність підтримання такого складу димових газів, який відповідає мінімальним втратам теплоти від хімічного недопалу та з газами, що відходять. А також за рахунок збільшеної кількості повітря дозволяє зменшити температуру горіння ТПВ в киплячому шарі.

– Імітаційне моделювання системи керування показало, що вона задовольняє вимогам щодо підтримання заданого теплового навантаження та щодо підтримання температури киплячого шару. Незначні відхилення потужності та температури швидко компенсуються, забезпечуючи стабільну роботу установки. Концентрація оксиду сірки у димових газах залишається в межах допустимих значень, що свідчить про екологічну безпеку процесу.

Ключові слова: ТПВ, АСК, термічна деструкція, піроліз, спалювання, ідентифікація, класифікація, сортування, синтез-газ, метод нечіткого керування, нечітка підсистема, ЦКШ, екологічні показники.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Lysiuk H., Maksymova O. Model and method of solid household waste sorting for their effective thermal disposal. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 31-46. DOI:<https://doi.org/10.23939/jeeecs2023.01.031>

2. Brunetkin O., Davydov V., Butenko O., Lysiuk G., Bondarenko A. Determining the composition of burned gas using the method of constraints as a problem of model interpretation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3, N 6 (99). P. 22-30. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169219> (SCOPUS)

3. Kozlov O., Kondratenko Y., Lysiuk H., Kryvda V., Maksymova O. Fuzzy Automatic Control of the Pyrolysis Process for the Municipal Solid Waste of

Variable Composition . Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems. 2022. Vol.16, N° 1. P. 83-94. DOI:10.14313/JAMRIS/1-2022/9 URL:<https://sciendo.com/pl/article/10.14313/jamris/1-2022/9> (SCOPUS)

4. Петік Т.В., Лисюк Г.П. Автоматична система регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку 1000 МВт атомної електричної станції. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30 (69), Ч. 2, №3. С.7-13. DOI:<https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/02> URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_2/4.pdf

5. Lysiuk H., Filippov Y., Panin V. Justification of equipment structure for solid municipal waste incineration. Grail of science. 2024. №47. P.461-466. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.12.2024.061> URL:<https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/20.12.2024/35>

6. Сичило А.А., Беглов К.В., Лисюк Г.П. Моделювання АСР потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 в режимі «Т». Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30 (69) Ч. 1 № 3. С.158-163. DOI:<https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/29> URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/3-1_2019.pdf

7. Терлецький В.О., Лисюк Г.П. Моделювання АСР температури пару за редуційно-охолоджуваль ною установкою енергоблоку АЕС ВВЕР 1000 МВт. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30(69), Ч.1, № 3. С. 170-174. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/31> URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/33.pdf

8. Lysiuk H., Sokoliuk S., Solohub O., Stafidov Y. Research on methods to reduce harmful emissions during the combustion of solid municipal waste in circulating fluidized bed furnaces. Modern engineering and innovative technologies. 2024. №36, Part 2. P.77-83. DOI:10.30890/2567-5273.2024-36-00-013

URL:<https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit36-02/meit36-02>

9. Чорнофостова К.В., Лисюк Г.П. Підвищення якості регулювання рівня в баці деаератора енергоблоку АЕС із ВВЕР-1000. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30 (69), Ч. 1 № 3. С. 200-205. DOI:<https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/36>

URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/38.pdf

10. Сичило А.А., Беглов К.В., Лисюк Г.П. Розробка АСК потужності енергоблоку АЕС3 ВВЕР-1000 в режимі «Т» (частина 2). Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. 2020. Том 31 (70), Ч. 1 № 2. С.181-186. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/28>

11. Maksymova O.V., Lysiuk H.P., Zhanko K.O., Bessarab V.P. Model and method of decision-making rules for the formation of the structure of technical equipment in processes of thermal destruction of msw in the normation of acid gases emissions. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2024. № 39(115). С. 42- 54. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.39.115.2024.5>

12. Лисюк Г.П. Синтез системи управління тепловим навантаженням барабанного котла при спалюванні твердих побутових відходів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35 (74), № 5. С.178-187. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/27>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

13. Davydov V., Brunetkin V., Lysiuk G. Solution of the Inverse Incorrectly Posed Problem by the Library Method. Proceedings of the 12th International Conference on Applied Innovations in IT (ICAИТ), March 2024 Volume 12, Issue 1. P. 97-103. SCOPUS ISSN 2199-8876 DOI: <http://dx.doi.org/10.25673/115729> (SCOPUS)

14. Лисюк Г.П., Белов В.О., Рябошапка Р.М., Торопенко О.В. Метод сортування твердих побутових відходів для їх ефективної термічної

утилізації. III Міжнародна науково-практична конференція «Science in the modern world: innovations and challenges». Торонто, Канада. 2024. С.281-287. URL: https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/SCIENCE-IN-THE-MODERN-WORLD-INNOVATIONS-AND-CHALLENGES-21-23.nov_.24.pdf

15. Лисюк Г.П., Лінник О.О., Лесів Б.І., Горалік О.Є. Метод нечіткого керування процесом піролізу твердих побутових відходів змінного складу. I Міжнародна науково-практична конференція «Future of science: innovations and perspectives». Стокгольм, Швеція. 2024. С.265-269. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/FUTURE-OF-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PERSPECTIVES-25-27.11.24.pdf>

16. Лисюк Г.П., Арику І.В., Соколюк С.О. Нечітка підсистема визначення оптимальних параметрів процесу піролізу. XIII Міжнародна науковопрактична конференція «Innovations in modern education: European and global context». Краків, Польща. 2024. С.308-310. URL: <https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2024/10/INNOVATIONS-IN-MODERN-EDUCATION-EUROPEAN-AND-GLOBAL-CONTEXT.pdf>

17. Лисюк Г.П., Бабенко О.В., Захаров Ю.Ф., Мітяєв В.Б., Попов О.Ю. Удосконалення математичної моделі спалювання твердого палива змінного складу в топках з циркулюючим киплячим шаром. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Cultural and artistic processes in the context of the European scientific space». Валенсія, Іспанія. 2024. С.337-341. URL: <https://isg-konf.com/uk/cultural-and-artistic-processes-in-the-context-of-the-european-scientific-space/>

18. Лисюк Г.П., Скліфасовський Д.Є., Сологуб О.В., Стафідов Є.Б. Ефективність та керування термічною утилізацією твердих побутових відходів у топках із киплячим шаром. XLIX Міжнародна науково-практична конференція «New Areas of Scientific Research: Exploring New Frontiers». Неаполь, Італія. 2024. С.38-43. URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/11/New_areas_of_scientific_research_exploring_new_frontiers_November_27-29_2024_Naples_Italy.pdf

19. Лисюк Г.П., Сухань Р.В., Хирний В.І., Чебаненко М.О. Метод розрахунку витрат на забезпечення термічної утилізації твердих побутових відходів з дотриманням екологічних нормативів. IV Міжнародна науково-практична конференція «Science and technology: challenges, prospects and innovations». Осака, Японія. 2024. С.261-266. URL:<https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-CHALLENGES-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-28-30.11.24.pdf>

ABSTRACT

Lysiuk H. P. Models and Methods of Automated Control Systems for the Thermal Destruction of MSW to Ensure Environmental Indicators Based on Sorting. – Manuscript copyright.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 – Automation and Computer-Integrated Technologies. – Odessa Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2025.

The dissertation is dedicated to the development and improvement of models and methods for automated control systems (ACS) in the technological processes of pyrolysis and incineration of municipal solid waste (MSW) based on automated MSW sorting by chemical composition. The goal is to ensure effective control over their thermal destruction, enhance the energy efficiency of waste utilization technologies, and minimize negative environmental impacts. The study takes into account environmental regulations, including monitoring the formation of harmful emissions such as acid gases.

In the first chapter, "Models and Methods of ACS for the Thermal Destruction of MSW," the following results were obtained:

– An analysis of MSW processing methods showed that thermal destruction is the most effective among all applied technologies. Its key advantages include effective waste neutralization, complete elimination of pathogenic microorganisms, a significant reduction in waste volume by mass, and the utilization of its energy potential. Additionally, thermal destruction meets business technology requirements by maximizing the production of valuable end products and minimizing harmful emissions into the environment.

– An analysis of models and methods for automating technological processes of MSW thermal destruction indicated that improving efficiency while complying with environmental standards requires research in the field of automated sorting by chemical composition, particularly focusing on groups that generate acid gases. The property of identity between the gross formulas of the raw material and the reaction products can serve as the basis for determining the composition of hydrocarbon

substances during MSW sorting, based on the thermochemical processing of the studied raw material samples.

– It was established that sorting MSW through identification and classification of raw materials with specified characteristics allows for the processing of industrial volumes of MSW.

– The necessity of formulating a decision-making criterion for selecting the most efficient and environmentally friendly thermal destruction method and developing the corresponding technical means structure was identified.

In the second chapter, "Model and Method of Automated Sorting for Further Processing by Thermal Destruction Methods," the following results were obtained:

– A simulation model of different MSW groups was developed, presented as a table of gross formulas for possible compounds forming MSW volumes. This model enables classification during the identification of MSW samples, particularly isolating groups that produce acid gases.

– A sorting method for MSW was developed, ensuring the most efficient processing of each group while meeting environmental standards. The method is based on a technological approach to sorting, a raw material sorting method incorporating measuring devices to ensure specified identification characteristics based on the classification features of the simulation model, and the application of measuring devices depending on the identification task, whether qualitative or quantitative.

– A simulation model of the purification process for carbon-hydrogen gases obtained from classified MSW, which includes components forming acid gases, was developed with compliance to environmental standards. Formulas for evaluating efficiency indicators and specific costs of thermal destruction for various sorted MSW groups were proposed. These formulas help develop a criterion for selecting between thermal destruction methods: MSW incineration in atmospheric air or pyrolysis for syngas production.

– A decision-making rule for choosing the MSW processing method while adhering to environmental standards was formulated, along with defining the

corresponding technical means structure based on the developed cost calculation method. This method considers efficiency indicators and specific costs of thermal destruction for different sorted MSW groups.

- A comprehensive technological scheme for MSW thermal destruction methods was developed, ensuring compliance with environmental regulations on emissions into the natural environment while utilizing secondary energy resources derived from MSW.

In the third chapter, "Method of Controlling the Pyrolysis Process of MSW with Variable Composition and Moisture Content Based on Fuzzy Logic," the following tasks were completed:

- The features of operation and main control tasks of a generalized pyrolysis unit used for MSW thermal destruction were examined.

- A fuzzy control method for the pyrolysis process of MSW with variable composition and moisture content was developed. This method enables accurate automated control of the pyrolysis unit by determining the optimal air/MSW consumption ratio. It ensures process efficiency and stabilizes interrelated controlled parameters, such as pyrolysis temperature and the gas holder level in transient modes.

- The ACS structure for the pyrolysis unit was developed to implement the proposed fuzzy logic-based method.

- A Takagi-Sugeno type fuzzy subsystem for determining optimal pyrolysis process parameters was designed. It includes five input variables (percentage composition of MSW types, MSW moisture content) and two output variables: specific coefficient and reactor temperature. The specific coefficient is determined to maximize the calorific value of the resulting pyrolysis gas while ensuring the highest reactor temperature to intensify the pyrolysis process in real-time.

- The effectiveness of the fuzzy control method for the pyrolysis process of MSW with variable composition was studied. Computer modeling results confirmed the high efficiency of the developed system and fuzzy control method, allowing for

automated control of the pyrolysis unit under changing MSW composition and moisture content.

In the fourth chapter, "ACS Synthesis for the Thermal Load of a Drum Boiler during MSW Incineration," the following tasks were completed:

- The technology of MSW utilization in energy-generating plants was reviewed. The structure of equipment operating with variable fuel composition (MSW) was justified. The analysis of steam boiler load control methods under disturbances in MSW composition was conducted. A boiler equipped with a circulating fluidized bed (CFB) furnace was chosen as the control object for further study. The use of CFB technology enables the regulation of bed temperature to reduce emissions of harmful sulfur and chlorine compounds.

- The system was decomposed into characteristic sections: CFB furnace, external heat exchanger, heat exchange surfaces heating the coolant, and the process of sulfur compound absorption with lime. A mathematical model integrating these sections was synthesized.

- An ACS for the installation was synthesized, defining regulated technological variables and control influences. Four main regulators were identified: power, bed temperature, efficiency, and emissions of harmful substances. It was decided to exclude the signal on the calorific value of MSW from the power regulator, as abrupt changes in fuel consumption could lead to emergency situations. However, the introduction of a signal on theoretical air consumption increased the accuracy of maintaining the flue gas composition at a level that minimizes heat losses due to chemical underburning and exhaust gases. Additionally, an increased air supply allows for a reduction in the combustion temperature of MSW in the fluidized bed.

- Simulation modeling of the control system demonstrated compliance with the required heat load and fluidized bed temperature stability. Minor deviations in power and temperature were quickly compensated, ensuring stable operation of the system. The concentration of sulfur oxides in the flue gases remained within permissible limits, indicating the environmental safety of the process.

Keywords: MSW, ACS, thermal destruction, pyrolysis, incineration, identification, classification, sorting, syngas, fuzzy control method, fuzzy subsystem, CFB, environmental indicators.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Lysiuk H., Maksymova O. Model and method of solid household waste sorting for their effective thermal disposal. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 31-46. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2023.01.031>

2. Brunetkin O., Davydov V., Butenko O., Lysiuk G., Bondarenko A. Determining the composition of burned gas using the method of constraints as a problem of model interpretation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3, No. 6 (99). P. 22-30. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169219> (SCOPUS)

3. Kozlov O., Kondratenko Y., Lysiuk H., Kryvda V., Maksymova O. Fuzzy Automatic Control of the Pyrolysis Process for the Municipal Solid Waste of Variable Composition. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*. 2022. Vol. 16, No. 1. P. 83-94. DOI:10.14313/JAMRIS/1-2022/9 URL:<https://sciendo.com/pl/article/10.14313/jamris/1-2022/9> (SCOPUS)

4. Petik T.V., Lysiuk H.P. Automatic water level control system in the steam generator of a 1000 MW power unit of a nuclear power plant. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*. 2019. Vol. 30 (69), Part 2, No. 3. P. 7-13. DOI:<https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/02> URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_2/4.pdf

5. Lysiuk H., Filippov Y., Panin V. Justification of equipment structure for solid municipal waste incineration. *Grail of science*. 2024. №47. P. 461-466. DOI:<https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.12.2024.061> <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/20.12.2024/35>

6. Sychilo A.A., Beglov K.V., Lysiuk H.P. Modeling of the power control system of a nuclear power plant unit with VVER-1000 in "T" mode. Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences. 2019. Vol. 30 (69), Part 1, No. 3. P. 158-163. URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/31.pdf

7. Terletskyi V.O., Lysiuk H.P. Modeling of the steam temperature control system for the reduction-cooling installation of a VVER-1000 MW nuclear power plant unit. Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences. 2019. Vol. 30 (69), Part 1, No. 3. P. 170-174. URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/33.pdf

8. Lysiuk H., Sokoliuk S., Solohub O., Stafidov Y. Research on methods to reduce harmful emissions during the combustion of solid municipal waste in circulating fluidized bed furnaces. Modern engineering and innovative technologies. 2024. №36, Part 2. P. 77-83. DOI:10.30890/2567-5273.2024-36-00-013 URL:<https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit36-02/meit36-02>

9. Chornofostova K.V., Lysiuk H.P. Improving the quality of level control in the deaerator tank of a nuclear power plant unit with VVER-1000. Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences. 2019. Vol. 30 (69), Part 1, No. 3. P. 200-205. URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/38.pdf

10. Sychilo A.A., Beglov K.V., Lysiuk H.P. Development of the power control system of a nuclear power plant unit with VVER-1000 in "T" mode (part 2). Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. 2020. Vol. 31 (70), Part 1, No. 2. P. 181-186. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/28>

11. Maksymova O.B., Lysiuk H.P., Zhanko K.O., Bessarab V.P. Model and method of decision-making rules for the formation of the structure of technical equipment in processes of thermal destruction of MSW in the normation of acid

gases emissions. *Electrotechnical and Computer Systems*. 2024. No. 39(115). P.42-45. DOI:<https://doi.org/10.15276/eltecs.39.115.2024.5>

12. Lysiuk H.P. Synthesis of the control system for the thermal load of a drum boiler when burning solid household waste. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 35 (74), No. 5. P. 178-187. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/27>

Published works of approbation nature:

13. Davydov V., Brunetkin V., Lysiuk G. Solution of the Inverse Incorrectly Posed Problem by the Library Method. *Proceedings of the 12th International Conference on Applied Innovations in IT (ICAIIT)*, March 2024, Volume 12, Issue 1. P. 97-103. SCOPUS ISSN 2199-8876 DOI: <http://dx.doi.org/10.25673/115729> (SCOPUS)

14. Lysiuk H.P., Belov V.O., Ryaboshapka R.M., Toropenko O.V. Method of sorting solid household waste for their effective thermal utilization. *III International Scientific and Practical Conference "Science in the modern world: innovations and challenges"*. Toronto, Canada. 2024. P. 281-287. URL: https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/SCIENCE-IN-THE-MODERN-WORLD-INNOVATIONS-AND-CHALLENGES-21-23.nov_.24.pdf

15. Lysiuk H.P., Linnik O.O., Lesiv B.I., Horalik O.Ye. Method of fuzzy control of the pyrolysis process of solid household waste of variable composition. *I International Scientific and Practical Conference "Future of science: innovations and perspectives"*. Stockholm, Sweden. 2024. P. 265-269. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/FUTURE-OF-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PERSPECTIVES-25-27.11.24.pdf>

16. Lysiuk H.P., Aryku I.V., Sokoluk S.O. Fuzzy subsystem for determining the optimal parameters of the pyrolysis process. *XIII International Scientific and Practical Conference "Innovations in modern education: European and global context"*. Krakow, Poland 2024. P. 308-310. URL: <https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2024/10/INNOVATIONS-IN-MODERN-EDUCATION-EUROPEAN-AND-GLOBAL-CONTEXT.pdf>

17. Lysiuk H.P., Babenko O.V., Zakharov Yu.F., Mityaev V.B., Popov O.Yu. Improvement of the mathematical model of combustion of solid fuel of variable composition in furnaces with a circulating fluidized bed. XIII International Scientific and Practical Conference "Cultural and artistic processes in the context of the European scientific space". Valencia, Spain. 2024. P. 337-341. URL: <https://isg-konf.com/uk/cultural-and-artistic-processes-in-the-context-of-the-european-scientific-space/>

18. Lysiuk H.P., Sklyfasovskyi D.Ye., Sologub O.V., Stafidov Ye.B. Efficiency and control of thermal utilization of solid household waste in fluidized bed furnaces. XLIX International Scientific and Practical Conference "New Areas of Scientific Research: Exploring New Frontiers". Naples, Italy. 2024. P. 38-43. URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/11/New_areas_of_scientific_research_exploring_new_frontiers_November_27-29_2024_Naples_Italy.pdf

19. Lysiuk H.P., Sukhan R.V., Khyrnyi V.I., Chebanenko M.O. Method for calculating the costs of ensuring the thermal utilization of solid household waste in compliance with environmental standards. IV International Scientific and Practical Conference "Science and technology: challenges, prospects and innovations". Osaka, Japan. 2024. P. 261-266. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-CHALLENGES-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-28-30.11.24.pdf>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	23
ВСТУП	24
РОЗДІЛ 1 МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АСК ТЕРМІЧНОЮ ДЕСТРУКЦІЄЮ ТПВ	33
1.1 Аналіз методів переробки ТПВ	33
1.1.1 Сортування ТПВ.....	34
1.1.2 Методи термічної деструкції ТПВ	35
1.1.3 Біотермічні методи.....	40
1.2 Моделі та методи автоматизації технологічних процесів термічної деструкції ТПВ	42
1.3 Висновки до розділу	61
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ І МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО СОРТУВАННЯ ДЛЯ ПОДАЛЬШОЇ ПЕРЕРОБКИ МЕТОДАМИ ТЕРМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ.	62
2.1 Формування імітаційної моделі ТПВ.....	66
2.1.1 Метод класифікації ТПВ та спосіб їх ідентифікації.....	66
2.1.2 Модель процесу термічної деструкції.....	68
2.1.3 Метод рішення моделі процесу термічної деструкції	74
2.1.4 Імітаційна модель ТПВ.....	75
2.2 Метод сортування ТПВ для подальшої переробки з максимальною ефективністю	78
2.2.1 Спосіб сортування ТПВ.....	78
2.2.2 Метод сортування ТПВ	79
2.2.3 Результати моделювання складу ТПВ.....	86
2.3 Імітаційна модель процесу очищення вуглецево-водневих газів	88

2.3.1	Урахування компонентів, що утворюють кислотні газоутворюючі елементи в моделі процесу термічної деструкції.	90
2.3.2	Оцінка ефективності термічної деструкції ТПВ.....	90
2.3.3	Оцінка питомих витрат термічної деструкції ТПВ	93
2.4	Правило прийняття рішення для формування структури технічних засобів при переробці ТПВ.....	93
2.4.1	Модель витрат на мінімізацію впливу речовин, що утворюють кислі гази для різних компонентів ТПВ.....	94
2.4.2	Модель витрат очищення синтез-газу та димових газів	96
2.4.3	Результати моделювання очищення від кислих газів	97
2.5	Комплексна технологічна схема методів термічної деструкції ТПВ	102
2.5.1	Технічні засоби для переробки ТПВ	103
2.5.2	Етапи термічної утилізації груп ТПВ, які не утворюють при спалюванні кислі гази.....	104
2.5.3	Етапи термічної утилізації груп ТПВ, що утворюють при спалюванні кислі гази.....	104
2.6	Висновки до розділу	105
РОЗДІЛ 3. МЕТОД КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПІРОЛІЗУ ТПВ ЗМІННОГО СКЛАДУ ТА ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ		107
3.1	Метод нечіткого керування процесом піролізу ТПВ змінного складу ...	108
3.1.1	Особливості та завдання керування узагальненої піролізної установки термічної деструкції ТПВ.....	108
3.1.2.	Основні аспекти методу нечіткого керування процесом піролізу ТПВ змінного складу	111
3.2	Структура АСК піролізної установки	116

3.3 Нечітка підсистема визначення оптимальних параметрів процесу піролізу	117
3.4 Ефективність методу нечіткого керування процесом піролізу ТПВ змінного складу	123
3.5 Висновки до розділу	129
РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ АСК ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ БАРАБАННОГО КОТЛА ПРИ СПАЛЮВАННІ ТПВ.....	131
4.1 Обґрунтування структури устаткування, що експлуатується при зміні складу ТПВ	132
4.2. Аналіз методів керування навантаженням парових котлів при збуреннях складом ТПВ.....	136
4.3. Постановка задачі керування навантаженням парогенеруючого устаткування	139
4.4. Математична модель спалювання ТПВ змінного складу в топці з ЦКШ	141
4.4.1. Математична модель процесу горіння твердого палива у вигляді ТПВ в псевдо-рідинному шарі.....	142
4.4.2 Математична модель передачі тепла робочому тілу в поверхнях нагріву	149
4.4.3 Мінімізація викидів шкідливих речовин	152
4.5. Дослідження об'єкта керування за його динамічною моделлю.	160
4.5.1. Синтез імітаційної моделі	160
4.5.2 Методи керування топками з ЦКШ	163
4.5.3 Обчислювальний експеримент АСК.....	167
4.6 Висновки до розділу	172
ВИСНОВКИ.....	174

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	176
ДОДАТОК А.....	198
ДОДАТОК Б	202

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТПВ – тверді побутові відходи

АСК – автоматизована система керування

ШНМ – штучна нейронна мережа

ККД – коефіцієнта корисної дії

ПД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

CFD – методи обчислювальної гідродинаміки

ПЭТФ – поліетиленглікольтерефталат

ПЗ – продукти згоряння

ЦКШ – циркулюючий киплячий шар

ПХДД – поліхлоровані дибензо-п-діоксини

ПХДФ – поліхлоровані дибензофурани

ВСТУП

Актуальність теми.

Суттєве збільшення обсягів сміття, спричинене війною, стає питанням національної безпеки. Сміття, яке утворюється внаслідок боїв, вимірюється сотнями тисяч тонн[1]. Прифронтові та деокуповані громади різною мірою постраждали від війни. Київська область зіштовхнулася з наслідками інтенсивних боїв та мінувань; Харківська область найбільше постраждала від обстрілів з РСЗВ та ракетних ударів; Херсонська область зазнала руйнувань не лише безпосередньо від бойових дій, але й від підтоплення внаслідок підриву дамби Каховської ГЕС. У громадах було зруйновано або пошкоджено житлові й громадські приміщення, релігійні й культурні споруди. Україна зіштовхнулася з безпрецедентними руйнуваннями, а отже, з величезною кількістю великогабаритного будівельного сміття [2].

За даними Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України, станом на квітень 2024 року в Україні утворилося всього 223237,3 тонн відходів від руйнувань. Найбільше відходів утворилося в Київській області – 189229,4 тонн, а також у Донецькій (4429,7 тонн), Запорізькій (5343 тонн) та Миколаївській (6010,3 тонн) областях. Чернівецька область подала інформацію про кількість утворених відходів в об'ємі 36092,6 метрів кубічних. По Вінницькій, Волинській, Закарпатській, Луганській, Полтавській, Херсонській областях інформація в міністерства відсутня[3].

Будівельні відходи заповнюють легальні та нелегальні сміттєзвалища швидше, ніж побутові, оскільки складаються з габаритних і важких матеріалів. Водночас це сміття містить десятки фракцій, частину яких можна переробити і використати повторно в будівництві чи промисловості. Частина відходів містить токсичні речовини, що забруднюють повітря, ґрунт і підземні води. За підрахунками Міндовкілля, орієнтовні екологічні збитки внаслідок засмічення земель перевищують 900 млрд грн [2].

Сміттєві полігони в деяких регіонах тепер мають більше навантаження через тимчасове переміщення людей з окупованих територій всередині країни. Зокрема, Полтавщина прийняла близько 150 тис. людей, які були змушені покинути свою домівку, Полтава — близько 90 тис. людей.

Згідно з даними Міністерства розвитку громад та територій України, станом на 1 червня 2022 року, було знищено та пошкоджено 5% всіх існуючих сміттєзбиральних автомобілів, 17% всіх біогазових установок, 9% сортувальних ліній. Прямі збитки сфери управління відходами становили 95,36 млн доларів, орієнтовна вартість вивезення будівельного сміття/завалів становила 320,70 млн доларів, а втрата прибутків підприємствами з утилізації сміття – 11,9 млн доларів. Ця оцінка була проведена лише щодо окремих регіонів України, як-от: Донецької, Луганської, Харківської, Київської та Чернігівської областей, але вона дає змогу оцінити загальний масштаб потенційних збитків по всій території України[4].

Важливо також враховувати, що відходи від руйнувань можуть містити небезпечні матеріали, такі як азбест, свинець та інші токсичні речовини. Це вимагає спеціальних методів обробки та утилізації, щоб уникнути додаткового забруднення навколишнього середовища. Крім того, необхідно розробити ефективні системи моніторингу та звітності для відстеження обсягів і складу відходів, а також їхнього впливу на здоров'я населення та екологію [5,6].

Оптимальна модель поводження з відходами руйнації війни, в уяві населення, повинна базуватися на чотирьох ключових принципах: максимальна відповідальність влади та комунальних підприємств, чітка комунікація щодо процедури поводження з відходами, сортування та вторинна переробка відходів[7].

Аналіз безлічі способів вторинної переробки ТПВ дозволив дійти невтішного висновку, що з усіх застосовуваних технологій високі споживчі властивості демонструє термічна деструкція за критерієм ефективності. Головними перевагами такої технології є ефективне знешкодження відходів у тому числі повне знищення патогенної мікрофлори; зменшення обсягу

відходів на один порядок по масі; використання енергетичного потенціалу відходів органічного походження[3].

Крім того, термічна деструкція відповідає вимогам бізнес-технологій, а саме: виробництво максимальної кількості цінного кінцевого продукту та забезпечення мінімальної кількості викидів у навколишнє природне середовище шкідливих речовин. У практиці термічної деструкції найбільшого поширення набули чотири способи термохімічного перетворення ТПВ: спалювання, газифікація, піроліз та термічна модифікація. Піроліз, своєю чергою, ділиться на повільний і швидкий [2].

Кожна технологія передбачає свою мету [7]. При спалюванні сировини визначається можливість максимального тепловиділення шляхом виключення недопалу вихідної сировини чи подачі надлишку повітря. Метою газифікації є мінімізація енергетичних витрат на процес перетворення сировини за умови отримання суміші горючих газів максимально можливої теплотворної здатності. Для організації процесу піролізу сировини потрібно підведення енергії у формі тепла і відсутність повітря або окисних газів. Як продукт процесу піролізу виступають вуглисті залишок, конденсуються речовини і неконденсовані гази. Слід зазначити, що будь-яка технологія термічної деструкції для забезпечення заданих екологічних та технічних показників ефективності вимагає сталості та визначеності складу сировини, що переробляється [7].

Аналіз складу промислових обсягів показав, що ТПВ є випадковим набором гомогенних і гетерогенних речовин з відомими властивостями. Такий стан речей робить практично неможливим пряме використання ТПВ в якості сировини для будь-якої технології термічної деструкції. Необхідність удосконалення моделей та методів автоматизованих систем керування (АСК) процесів піролізу та спалювання твердих побутових відходів на основі їх сортування для підвищення ефективності їхньої утилізації та забезпечення екологічно регламентованих показників і визначає актуальність цієї роботи.

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

Роботу виконано відповідно до Порядку управління відходами, що утворилися у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків, затвердженого постановою КМУ від 27 вересня 2022 р. № 1073, доповненим пунктом 25 згідно з Постановою КМ № 1073 від 27.09.2022, та відповідно до внесених змін згідно з Постановами КМ №416 від 28.04.2023 та №964 від 23.08.2024. Відповідно до Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 р. згідно з Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820 –р. Київ. Відповідно до Національного плану управління відходами до 2030 р. згідно з Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 лютого 2019 р. № 117-р. Київ. Згідно з Законом України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX.

Відповідає планам, затвердженим Міністерством освіти і науки України, виконаним у Національному університеті «Одеська політехніка», і є складовою частиною держбюджетних НДР за темами: «Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи визначення якісного складу паливної суміші природнього та штучного походження», НДР № 239-47, (№0123U104326), «Розробка моделі та методу математичного забезпечення автоматизованих систем керування, які використовують паливо змінного складу для зменшення енергоємності виробництва», НДР №206-47, (№0122U000566) і «Підвищення ефективності АСК спеціального призначення за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів», НДР №224-47, (№0122U200907).

Мета й завдання дослідження.

Розробка та вдосконалення моделей та методів термічної деструкції твердих побутових відходів з дотриманням екологічних показників через створення АСК для класифікації та ідентифікації відходів, що дозволяє виділити групи, які утворюють кислі газу, та враховувати ефективність термічної утилізації різних груп відсортованих ТПВ.

Для досягнення мети, необхідно:

- провести аналіз методів АСК термічної деструкції твердих побутових відходів, технологій їх термічної утилізації;
- розробити метод сортування твердих побутових відходів та правило прийняття рішення щодо структури технічних засобів їх термічної деструкції.
- розробити модель та метод нечіткого керування процесом піролізу твердих побутових відходів змінного складу;
- розробити модель та метод автоматизованого керування тепловим навантаженням барабанних котлів при спалюванні твердих побутових відходів змінного складу.

Об'єкт дослідження – процеси сортування та термічної утилізації твердих побутових відходів змінного складу та вологості в АСК технічних об'єктів, що забезпечують високі якісні та кількісні показники функціонування.

Предмет дослідження – методи та моделі автоматизованого сортування твердих побутових відходів також методи та моделі керування енергетичними установками, що здійснюють термічну деструкцію ТПВ, за умови пошуку утворення синтез-газу максимальної теплотворної здатності та мінімізації шкідливих викидів.

Методи дослідження.

Для проведення дисертаційного дослідження були використані: моделювання зміни теплотвірної здатності ТПВ залежно від якісного складу ТПВ, визначеного через брутто-формулу, дозволило обґрунтувати процес утворення продуктів термічної деструкції і визначення їх температури; метод нечіткої логіки типу Такагі-Сугено для керування процесом піролізу ТПВ змінного складу та вологості; методи системного аналізу використані для декомпозиції технологічного процесу; імітаційне моделювання підтвердило отримані теоретичні результати, на підставі чого можна зробити висновок, що система керування задовольняє вимогам щодо підтримки заданого теплового

навантаження; комп'ютерні інформаційні та програмні технології для реалізації розробленого алгоритму керування.

Наукова новизна отриманих результатів.

– Запропоновано метод сортування промислових обсягів сировини на основі класифікації та ідентифікації ТПВ з використанням імітаційної моделі бруutto-формул, що дозволяє виділити групи, які утворюють кислі гази, і на основі цього розроблено спосіб розрахунку витрат на забезпечення екологічних показників, включаючи процес очищення вуглеводневих газів та формулювання правила прийняття рішень для створення структури технічних засобів обраного методу термічної деструкції ТПВ з дотриманням екологічних норм.

– Знайшов подальший розвиток метод нечіткого керування процесом піролізу твердих побутових відходів змінного складу та вологості, який забезпечує правильне автоматизоване керування піролізною установкою з визначенням оптимального співвідношення витрати повітря/ТПВ, що дозволяє забезпечити ефективність процесу термічної деструкції та вирішувати завдання стабілізації таких взаємопов'язаних керованих параметрів процесу, як температура піролізу та значення рівня в газгольдері в перехідних режимах.

– Знайшла подальший розвиток математична модель спалювання твердих побутових відходів змінного складу в топках з киплячим циркулюючим шаром з урахуванням наявності в суміші органічних сполук, що містять сірку та хлор, та запропонована система автоматизованого керування з використанням первинного регулювання температури киплячого шару за сигналом витрати повітря та вторинного регулювання – за рахунок винесеного трубчастого теплообмінного апарату, що дозволяє забезпечити ефективність процесу спалювання паливної суміші, компенсувати зміни навантаження палива та виконати дотримання екологічних показників.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблені моделі та методи АСК процесів піролізу та спалювання ТПВ на основі їх сортування для підвищення ефективності їх утилізації та забезпечення екологічно регламентованих показників.

Результати роботи впроваджено в ТОВ “КОНКРИТ-СИСТЕМС” у виробничий процес, а саме: метод сортування промислових обсягів сировини на основі класифікації та ідентифікації твердих побутових відходів, що дозволяє виділити групи, що утворюють кислі гази, та метод розрахунку витрат на забезпечення екологічних показників проведення процесу термічної утилізації, включаючи процес очищення вуглеводневих газів. Запропоновані методи дозволяють вибрати максимально ефективний та екологічно чистий спосіб термічної деструкції твердих побутових відходів. Також матеріали дисертаційної роботи використовуються Національним університетом «Одеська політехніка» при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямом «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» в Інституті штучного інтелекту та робототехніки (ІШІР) на кафедрі «Програмних і комп’ютерно-інтегрованих технологій» при викладанні наступних дисциплін: «Автоматизація виробничих процесів», «Моделювання процесів і систем», «Сучасні системи керування», «Оптимальні та адаптивні системи управління».

Особистий внесок здобувача.

Наукові результати, викладені в дисертації, отримані автором самостійно. Автору належать основні ідеї у вдосконаленні моделей та методів АСК термічною деструкцією ТПВ з метою забезпечення екологічних стандартів шляхом сортування. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: в [8, 9, 10, 11]– метод сортування твердих побутових відходів для їхньої можливої подальшої переробки кожної групи з максимальною ефективністю та дотриманням екологічних показників; в [12, 13] – модель і метод правила прийняття рішення для формування структури технічних засобів в процесах термічної деструкції ТПВ при нормуванні

викидів кислих газів; в [14,15,16]– метод нечіткого керування процесом піролізу твердих побутових відходів змінного складу та вологості; [17-26]– система керування тепловим навантаженням барабанного котла при спалюванні твердих побутових відходів змінного складу в топках з киплячим циркулюючим шаром з урахуванням наявності в суміші органічних сполук, що містять сірку і хлор.

Апробація результатів роботи.

Результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися і отримали схвалення на конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція Solution of The Inverse Incorrectly Posed Problem By The Library Method. International Conference on Applied Innovations in IT (ICAИT), 2024/03/07, Koethen, Germany; III Міжнародна науково-практична конференція «Science in the modern world: innovations and challenges» 2024 р. Торонто, Канада; I Міжнародна науково-практична конференція “Future of science: innovations and perspectives”, 2024, Стокгольм, Швеція; XIII Міжнародна науковопрактична конференція «Innovations in modern education: European and global context», 2024 р., Краків, Польща; XIII Міжнародна науково-практична конференція «Cultural and artistic processes in the context of the European scientific space», 2024 р., Валенсія, Іспанія; XLIX Міжнародна науково-практична конференція «New Areas of Scientific Research: Exploring New Frontiers», 2024, Неаполь, Італія; IV Міжнародна науково-практична конференція «Science and technology: challenges, prospects and innovations», 2024 р., Осака, Японія.

Публікації

Результати наукових досягнень викладені в 19 друкованих працях, з них 12 – у спеціалізованих наукових виданнях (2 публікації – у міжнародній науково-метричній базі SCOPUS), 7 – доповіді і тези доповідей на міжнародних конференціях (1 публікація – у міжнародній науково-метричній базі SCOPUS).

Структура та обсяг роботи.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел з 147 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 206 сторінок (з них 151 – основного тексту), 34 рисунки, 9 таблиць та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1 МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АСК ТЕРМІЧНОЮ ДЕСТРУКЦІЄЮ ТПВ

1.1 Аналіз методів переробки ТПВ

Під час війни збільшується кількість не лише ТПВ, а й відходів після воєнних дій, вирішувати проблему яких також доведеться в нашій країні, зокрема, велика кількість будівельних уламків, які неможливо використати повторно, оскільки термодетформовані та містять азбест. Деякі будівельні відходи можна переробити в сировину для виробництва інших, більш дешевих матеріалів, проте це вимагає лабораторних досліджень та процесу самої переробки, яка може бути суттєво дорогою.

Говорячи про утилізацію відходів, насамперед їх потрібно відсортувати.

Наступний за сортуванням крок – це зменшення обсягу цих відходів.

У світовій практиці знайшли промислове застосування такі методи переробки ТПВ:

сортування (із вилученням цінних компонентів для вторинного використання); термічна деструкція; біотермічна аеробна ферментація (з отриманням добрива, біопалива); анаеробна ферментація (з отриманням біогазу).

Також використовується комплексна переробка – комбінація різних методів: ферментація – сортування, ферментація – сортування – термообробка, сортування – ферментація, термообробка – сортування, сортування – термообробка тощо.

Переробку відходів слід відрізняти від утилізації. Метою переробки є перетворення відходів на вторинну сировину, енергію чи продукцію з певними споживчими властивостями, цим вирішуються дві задачі:

1. екологічна – зменшується кількість накопичених відходів і цим значно знижується вміст токсичних викидів в атмосферу;

2. економічна – попередній збір та сортування ТПВ дозволять повернути у переробку значну кількість вторинної сировини, макулатури, полімерів та ін.

1.1.1 СОРТУВАННЯ ТПВ

Сортування відходів від руйнування передбачає повернення зібраних матеріалів у цивільне поводження з використанням їх як вторинної сировини[6]:

– «Чернець», так називають подрібнений метал, може бути повернутий в обіг після переплавлення.

– Будівельні «кам'яні» залишки придатні для виробництва різного виду будівельної продукції. Насамперед ідеться про підсіпки під дороги, ними ж можна засипати вирви від розривів снарядів.

– Уцілілі уламки будинків можна використовувати як будівельні матеріали.

– Повалені дерева йдуть на друзки.

– Щебінь, отриманий із переробленого бетону, слугує для засипки боліт і котлованів, а також для створення тимчасових доріг.

– Асфальт повторно застосовують у будівництві доріг, але спочатку його термічно обробляють за дуже високої температури.

– Арматуру так само повторно використовують у будівництві й у багатьох інших випадках.

– Також таке сміття може застосовуватись у будівельних конструкціях для створення бетону низької марки.

У величезній кількості сміття, вироблене людством, є велика кількість матеріалів, які можна застосувати повторно, та їхня ринкова вартість досить висока. Отримання цих матеріалів здійснюється на сміттесортувальних станціях.

З ТПВ витягуються чорні та кольорові метали, скло, папір, пластмаси, органічні речовини, що використовуються надалі у виробництві у низці цінних продуктів. Певна технологія сортування та обробки ТПВ забезпечує отримання з відходів високоякісного палива у вигляді гранул та брикетів.

Сортування ТПВ також є ефективною операцією перед термо- та біообробкою відходів. За опублікованими даними, попереднє сортування ТПВ, видалення металевих компонентів, відпрацьованих електробатарейок та акумуляторів, деяких видів синтетичних матеріалів зменшує при спалюванні викиди ртуті та миш'яку на 70-75 %, свинцю – на 40 %. При цьому ефективність спалювання та ферментації ТПВ підвищується, а склад продуктів та відходів переробки покращується [27].

1.1.2 Методи термічної деструкції ТПВ

На сьогодні використовуються наступні основні методи термічного знешкодження ТПВ: пряме спалювання; піроліз; газифікація [28].

Спалювання.

Спалювання є найпоширенішим методом термічної деструкції ТПВ, яке проводять в окисному середовищі при температурі не нижче 600 °С. У цьому випадку процес протікає автотермічно і не вимагає підтримки горіння введення додаткового палива. Найчастіше метод застосовують під час роботи сміттєспалювального заводу.

Перевагами методу є простота організації шламового господарства, компактність обладнання, низька вартість очищення газів, що відходять. Недолік методу полягає в необхідності попереднього сортування відходів. Вони не повинні містити у своєму складі сполуки фосфору, галогенів та сірки. В іншому випадку в процесі горіння утворюватимуться високотоксичні канцерогенні газові викиди, що містять діоксини та фурани [29].

Основною метою цього методу термічної деструкції є зменшення маси ТПВ, зміна складу, фізичних та хімічних властивостей з метою зменшення негативного впливу їх на довкілля; одержання енергії, що виділяється при горінні.

Спалювання ТПВ поділяють на групи: спалювання необроблених побутових відходів; спалювання спеціально підготовлених, очищених від баластових складових відходів підвищення їх теплотворної спроможності.

Найбільш поширені такі види устаткування термічної обробки ТПВ: сферичні печі; печі з псевдозрідженим (киплячим) шаром; обертові (барабанні) печі; циклонні печі; шахтні печі; печі з рідкою ванною розплаву; подові печі [30].

Спалювання у сферичних топках.

ТПВ, що підлягають спалюванню в сферичних топках, вимагають попередньої обробки: мають бути видалені великі фракції; відходи не повинні містити радіоактивних компонентів; у деяких випадках потрібно попереднє подрібнення.

Топки з сферичним спалюванням відходів розрізняються за типом і принципом роботи колосникових ґрат, які транспортують ТПВ та забезпечують хороше перемішування та проходження через різні температурні зони.

Температура 850–950 °С є оптимальною для ефективного спалювання на колосниковій решітці. У кінці повільної решітки, що рухається, залишки після згоряння падають у заповнене водою пристрій шлаковидалення.

Основна частина димових газів вигоряє при температурі від 850 °С до понад 1000 °С у зоні камери допалювання. Частина, що залишилася, охолоджується до 200-400 °С у розташованому далі паровому котлі. При цьому (у більшості випадків) утворюється перегріта пара, яку можна використовувати для виробництва електроенергії, як технологічна пара або для опалення [31].

Спалювання відходів у завислому (киплячому) шарі.

Спалювання в киплячому шарі здійснюють за рахунок створення шару дрібнодисперсного матеріалу, що продувається з низу в гору потоком газу зі швидкістю, що перевищує межу стійкості щільного шару, але недостатньою для винесення частинок з шару [32].

Відходи, що підлягають спалюванню у завислому шарі, вимагають попередньої обробки: повинні бути видалені великі фракції; відходи не

повинні містити радіоактивних компонентів; відходи підлягають подрібненню до необхідного розміру частинок.

Найпростіша топка з киплячим шаром має багато загальних конструктивних елементів із шаровою топкою. Принципова відмінність полягає в інтенсивному перемішуванні частинок, що забезпечує сталість температури по всьому об'єму (за висотою та перерізом) киплячого шару і, як наслідок, високі значення коефіцієнта тепловіддачі до поверхонь теплообміну.

Розрізняють модифікації киплячого шару: реактори зі стаціонарним киплячим шаром; реактори з циркулюючим киплячим шаром; реактори з киплячим шаром, що обертається.

Відмінність реактора з киплячим шаром, що циркулює, полягає в тому, що за топкою встановлюється циклон, у якому всі недогорілі частинки вловлюються і повертаються назад у топку. Частинки знаходяться в замкнутій системі топка-циклон-топка доти, доки не згорять повністю. Реактори цього типу так само економічні як камерні топки і мають екологічну перевагу. Топки з циркулюючим киплячим шаром відрізняються більш високим ступенем вигорання палива (98÷99 %), ніж котли зі стаціонарним киплячим шаром (90÷95 %) і можуть працювати з меншим коефіцієнтом надлишку повітря [33].

У реакторі з киплячим шаром, що обертається, котел має похилу решітку, розділену на 3 секції, що мають різну витрату повітря. Відбивачі, розташовані паралельно ґратам, забезпечують обертання шару. Два еліптичні вихори, що обертаються в протилежних напрямках, зустрічаються і стикаються в середині і (відповідно) зумовлюють оптимальний розподіл і інтенсивне стирання відходів. Ступінь вигорання відходів 99%. Для досягнення повного згорання токсичних компонентів у димових газах у зону, розташовану над киплячим шаром, вводиться вторинне повітря, що сприяє повному допалюванню димових газів при температурі 1100 °С - 1200 °С.

Спалювання відходів в обертових (барабанних) печах.

Барабанна піч, що обертається, представляє собою сталевий барабан, який обертається зі швидкістю 0,05-2 об/хв і має футеровку.

Барабанні печі встановлюються з невеликим нахилом у напрямку руху відходів. Температура барабанної печі залежить від морфологічного складу спалюваних відходів і підтримується в межах 900–1200 °С. Відходи, що надходять, перемішуються при обертанні барабана, підсушуються, частково газифікуються і переміщуються в зону горіння. Випромінювання від полум'я в цій зоні розжарює футерування печі, що допомагає горінню органічної частини відходів і підсушує відходи, що надходять. Сміття та паливо, а також окислювач (повітря), що подаються з боку завантаження, шлак вивантажується з протилежного торця печі у твердому вигляді або у вигляді розплаву.

Барабанні обертові печі в технологічному відношенні є найбільш універсальними для переробки великокускових відходів змінного складу.

Спалювання у циклонних печах.

Циклонний реактор витримує великі питомі масові навантаження, що обумовлено аеродинамічним газовим потоком та диспергуванням ТПВ спеціальним розпилювачем або безпосередньо швидкісним рухом газів обсягом реактора.

У газовому потоці циклонного реактора відбувається інтенсивне перемішування частинок відходів, що сприяє практично повному вигорянню токсичних органічних речовин безпосередньо всередині реактора. Завдяки відцентровій сепарації вловлюється більшість мінеральних складових (до 80 %), які потім викидаються з реактора в твердому чи розплавленому стані. Для знешкодження пастоподібних відходів, якщо здійснюється їхнє тонке диспергування, рекомендується використовувати циклонні реактори. Якщо розпилення таких відходів неможливе, наведені вище переваги нівелюються [34].

Піроліз.

Піроліз - процес термічного розкладання ТПВ під дією підвищеної температури без доступу або з обмеженим доступом кисню з виділенням

твердого вуглецевмісного залишку, пального піролізного газу, рідких органічних продуктів [35].

Розрізняють сухий та окисний піроліз:

Окислювальний піроліз - процес при частковому спалюванні відходів або безпосередньому контакті з продуктами згоряння палива, внаслідок чого утворюється твердий вуглецевий залишок (кокс), який можна використовувати, наприклад, як тверде паливо. Даний метод застосовується для знешкодження багатьох ТПВ, у тому числі «незручних» для спалювання або газифікації: в'язких, пастоподібних відходів, вологих опадів, пластмас, шламів з великим вмістом золи, забруднену мазутом, оліями та іншими сполуками, що пилять.

Сухий піроліз – процес без доступу окислювача, внаслідок чого утворюються піролізний газ із високою теплою згоряння, рідкі продукти та твердий вуглецевий залишок [36].

Сухий піроліз ділиться на три види залежно від температури:

- 1) низькотемпературний піроліз при температурі 450–500 °С.
- 2) середньотемпературний піроліз за температури до 800 °С. Дає вихід більшої кількості газу з меншою теплою згоряння та меншої кількості рідкого залишку та коксу.

- 3) високотемпературний піроліз (900-1050 °С). Тут спостерігається мінімальний вихід рідких та твердих продуктів та максимальне вироблення газу з мінімальною теплою згоряння – високоякісного пального, придатного для далеких транспортувань. У результаті зменшується кількість смоли та вміст у ній цінних легких фракцій.

Метод газифікації.

Газифікація відходів - процес термічної обробки ТПВ окислювачем з витратою нижче стехіометричного, з отриманням генераторного газу (синтез-газу) та твердого або розплавленого мінерального продукту. Синтез-газ може бути використаний як сировина у виробництві аміаку, метанолу, палив за

методом Фішера-Тропша, водню, а також електроенергії та тепла за комбінованим циклом.

Процес газифікації проводиться при температурах вище 900 °С, у якості газифікуючих агентів можуть служити повітря, повітря і водяна пара, кисень і водяна пара. Установа газифікації ТПВ містить вузол підготовки сировини, установку поділу повітря у разі застосування кисню як газифікуючого агента, комплексне встановлення очищення синтез-газу від продуктів побічних реакцій та інших шкідливих домішок [37].

Безперечною перевагою методу є значно менша (за деякими показниками — на порядки) кількість залишкових небезпечних речовин в емісійних газах. Це відчутно знижує витрати на системи очищення газів, що йдуть, одночасно зберігаючи сувору відповідність усім законодавчим європейським нормам щодо викиду шкідливих речовин в атмосферу.

1.1.3 Біотермічні методи

Аеробна ферментація (компостування).

Аеробна ферментація (компостування) одна із методів переробки ТПВ. Є регульованим процесом перетворення органічних відходів в компост або біопаливо з подальшою дезінфекцією, при якому контролюється надходження кисню, оптимальна температура і вологість матеріалу.

Для реалізації цієї технологічної схеми вихідне сміття має бути попередньо очищене від великогабаритних предметів, а також металів, скла, кераміки, пластмаси, гуми.

На сміттєпереробних заводах технологія компостування відбувається у наступному порядку. Спочатку ТПВ перевантажуються в бункер-накопичувач, потім краном в завантажувальні воронки, потім барабанні гуркоти, що обертаються, де поділяють на дві фракції - дрібну і велику. Дрібна фракція ТПВ проходить через дробарку, після чого надходить у біотермічні вежі при температурі близько 60°C. У барабані через 3-4 доби в результаті аеробного процесу відходи перетворюються на компост, який просівається на

віброгрохотах, а потім надходить на склад готової продукції. Велика фракція ТПВ спалюється в котлах при температурі 800–1000 °С. Димові гази очищаються в електрофільтрах на 96-98% і викидаються в атмосферу. У котлах утворюється пара з тиском 13 атм та температурою до 250 °С, яку частково використовують для потреб заводу та житлових будівель [38, 39].

За допомогою аеробної ферментації можна позбутися більшості органічних матеріалів, таких як листя, деревина, харчові, садові та сільськогосподарські відходи. Основним недоліком даного методу є те, що відходи не проходять належної первинної переробки та кінцевий продукт може містити сполуки важких металів, хімічно небезпечні речовини та ін.

Анаеробна ферментація.

Анаеробне зброджування (ферментація) - спосіб утилізації ТПВ, заснований на розкладанні органічних речовин мікроорганізмами без вільного кисню. Для анаеробного зброджування використовується газонепроникний реактор-анаеробний дигестер, що забезпечує сприятливі умови для перетворення мікроорганізмами вихідної сировини (органічної речовини) на біогаз і твердорідинний залишок (дигестат). Дігестат можна використовувати як органічне добриво, якщо вихідна сировина пройшла попередню сепарацію і є незабрудненими органічними відходами. Біогаз є сумішшю різних газів, які можуть бути перетворені на теплову та/або електричну енергію. Основним енергоносієм у біогазі є горючий газ метан (CH_4), вміст якого залежно від вихідної сировини та умов експлуатації варіюється від 50 до 75% [40].

Біогаз – газ, який отримують шляхом метанового бродіння біомаси. Розкладання біомаси відбувається за участю трьох типів бактерій. У цьому процесі кожен наступний тип бактерій використовує продукти життєдіяльності попередніх. Перший тип – гідролізні бактерії, другий – бактерії, що утворюють кислоту, і третій – бактерії, що утворюють метан.

Склад біогазу: метан (CH_4) – 55-75%, вуглекислий газ (CO_2) – 25-45%, водень (H_2) – 1-2% і сірководень (H_2S) – 1-3%. Нижча теплота згоряння становить 2,1-4,4 МДж/м³, жарова продуктивність – 935-1450 °С, нормальна

густина – 700-1200 кг/м³. Після очищення біогазу від CO₂ отримують біометан, який є повним аналогом природного газу, відрізняючись лише походженням [41].

Анаеробна ферментація органічної фракції ТПВ застосовується у тих випадках, коли є практична потреба в біогазі (з урахуванням його невисокої якості).

Аналіз методів утилізації ТПВ показав, що найбільш результативною серед існуючих технологій є термічна деструкція. Цей підхід має ряд вагомих переваг: ефективне знешкодження відходів, ліквідація патогенних мікроорганізмів, значне скорочення маси та об'єму відходів, а також раціональне використання енергетичного потенціалу органічної складової. Крім того, термічна деструкція характеризується високою екологічністю та економічною вигодою, сприяючи виробництву цінних кінцевих продуктів і мінімізуючи шкідливий вплив на навколишнє середовище. Згідно з дорожньою картою Європейського Союзу щодо утилізації побутових відходів, до 2035 року не більше 10% відходів повинно захоронюватися на звалищах [42]. Решта має бути перероблена або спалена. За даними Spiegel, наразі лише 16% пластикових відходів піддається переробці. Альтернативою спалюванню ТПВ є двостадійний процес піролізу з подальшим використанням отриманих горючих речовин в енергетичному обладнанні.

1.2 Моделі та методи автоматизації технологічних процесів термічної деструкції ТПВ

Автоматизація керування переробкою ТПВ охоплює широкий спектр завдань, підходи до вирішення яких дуже різноманітні. Так, наприклад, стабілізація та моніторинг рівня завантаженості піролізного реактора забезпечують роботу в безперервному режимі та є одними з найважливіших завдань автоматизованого керування технологічним процесом. У статті [43] наведено розробку поліметричної комп'ютеризованої системи моніторингу та автоматичного керування рівнем завантаженості піролізного реактора

комплексу екопірогенезису на основі непрямого методу вимірювання рівня завантаженості, який заснований на обчисленні значення за допомогою вимірювання інших параметрів системи керування завантаженням реактора, таких як: витрата виділеного в процесі роботи піролізного газу, рідкого палива, температура робочої зони реактора і лінійне переміщення поршня. Керування побудовано на основі нечіткої підсистеми обчислення рівня типу Мамдані та продемонструвало досить високі точність вимірювання та показники якості керування під час роботи із сумішшю відходів різного типу.

АСК температурою нагріву багатоконтурної піролізної установки , розробка якої представлена в статті [44], компенсує вплив мінливих факторів таким чином, щоб забезпечити постійне значення температури нагрівання реактора, тобто забезпечує регулювання потужності нагрівального пристрою реактора. Автоматизоване керування температурою нагрівання реактора багатоконтурної піролізної установки [44] реалізовано на базі синтезу нечіткого ПД регулятора типу Мамдані та Сугено. Наведено порівняльний аналіз показників якості з традиційним та нечіткими ПД-регуляторами для різних значень вхідних збурень. Найкращі показники має система із нечітким регулятором типу Сугено.

Нова схема керування технологічним процесом піролізу етилену зі структурою управління на двох рівнях автоматизації спроектована та реалізована в роботі [45]. Процес піролізу етилену досить складний, і реакції крекінгу не завжди піддаються повному контролю. Розроблена програма керування включає математичне моделювання процесу запуску печі за відмінних технологічних параметрів, реалізацію алгоритму керування.

Система контролю теплотворної здатності синтез-газу, що утворюється, в результаті піролізу агрогосподарських відходів представлена в роботі [46]. Інформація про склад сировини дозволяє розрахувати оптимальні параметри процесу піролізу і, відповідно, актуалізувати завдання контролера , а також дозволяє компенсувати зміни постійних часу об'єкта керування, спричинені змінами хімічного складу сировини, що дозволяє досягти високої стійкості

системи. Нечіткий контролер (Мамдані) здійснює фактичне керування реактором піролізу відповідно до еталонних впливів, отриманих від блоку розрахунку завдань контролера. Синтез-газ із реактора є виходом системи. Частину газу подають на вхід реактора, а іншу частину - в ізоентальпійний пристрій. Ізоентальпійний пристрій розраховує умовну брутто-формулу. Використовуючи отриману брутто-формулу, згідно з табличними значеннями підбирають оптимальну температуру і коефіцієнт надлишку окислювача для максимально можливої теплоти згоряння синтез-газу. Таким чином, при контролі витрати синтез-газу, що подається на реверс, забезпечується оптимальне значення в реакторі. Значення поточної температури в реакторі порівнюється з оптимальним, при цьому генерується сигнал помилки, що використовується нечітким регулятором, таким чином система керування остаточно замикається та вироджується в класичну систему контролю помилок. Вхідні та вихідні змінні нечіткого регулятора зважуються, тому значення всіх вхідних та вихідних сигналів коливаються в діапазоні $[-1; 1]$.

Для лінії автоматизованого керування використання ТПВ як паливо паралельно з газом, представлена система в розгорнутому комплексі на базі SCADA [47], що забезпечує температурний контроль у печі та контроль нормативних показників продуктів горіння.

АСК прогнозуючого контролера на основі моделі обмеження викидів для невеликої колосникової печі на біомасі в роботах представлена [48], [49]. Прогнозуючий контролер нечіткої моделі [48] представлений для невеликих колосникових печей та заснований на розрахованій моделі термічної деструкції біомаси. Декілька локальних лінійних контролерів призначені для вибраної кількості робочих точок з використанням метрики зазору. Отримані локальні прогнозуючі контролери поєднуються з функціями приналежності на формування глобальної нелінійної структури нечіткого керування. Представлена структура покликана поліпшити роботу в перехідному режимі, що встановився за рахунок застосування оптимальної стратегії керування з оцінкою стану, і охопити весь робочий діапазон печі. Порівнюються

представлені результати моделювання зі зворотним зв'язком контролера з прогнозуванням нечіткої моделі, контролера з прогнозуванням лінійної моделі та алгоритму ПІ-управління. Результати моделювання показали найкращі результати прогнозуючого контролера на нечіткій моделі.

У міру зростання вимог до ефективності спалювання та обмеження викидів також зростають вимоги до керування процесом термічної деструкції. У роботі [49] пропонується застосування модельного прогнозуючого контролера, який конкретно знижує викиди чадного газу (CO) у всіх робочих точках та збільшує гнучкість використання палива без втрати продуктивності. Модельний прогнозуючий підхід розширює існуючий статичний контролер з прямим зв'язком досліджуваної печі за допомогою контролера з динамічним зворотним зв'язком, який здатний поліпшити характеристики згоряння. Результати, отримані в результаті вимірювань зі зворотним зв'язком, показують, що концепція керування здатна знизити викиди чадного газу в режимі часткового навантаження до чотирьох разів, а помилка регулювання температури води, що подається для опалення, знижується майже вдвічі в перехідному режимі. Це досягається за рахунок включення моделі оцінки викидів в обмежену оптимізацію прогнозуючого контролера.

Комплексна модель Ейлера у статті [50] дозволяє моделювати згоряння великих частинок ТПВ, реалізує набір змінних, що представляють компоненти твердої біомаси. Зміна цих змінних імітує собою термічну деструкцію ТПВ та їх взаємодію з газовим потоком. Модель складається з кількох підмоделей реакцій теплопередачі та дифузії частинок. Також було запропоновано підмодель усадки деревини, проаналізовано температурну зміну частинки на кількох глибинах та проведено якісне порівняння їх усадки. Порівняння та аналіз дали хороший результат, незважаючи на деяку невизначеність щодо складу ТПВ та умов експерименту.

На даний час машинне навчання та штучні нейронні мережі широко використовуються в індустрії згоряння. Процес спалювання може бути зафіксований камерами, але інтерпретувати монотонне зображення полум'я

оператору складно. Штучні нейронні мережі використовуються для інтерпретації даних, зібраних оптичними, акустичними або іншими датчиками для моніторингу та кількісної оцінки процесів термічної деструкції. Надійний моніторинг процесу горіння має вирішальне значення для керування та оптимізації умов експлуатації. Передбачається, що візуалізація полум'я може надати інформацію про квазізгнovenний стан горіння, тим самим доповнюючи традиційні вимірювання, які зазвичай дають зворотний зв'язок, що запізнюється. [51-57], [58].

У роботі [51] досліджується використання глибоких нейронних мереж для прогнозування теплової потужності котла на біомасі з колосниковими ґратами потужністю 3 МВт на основі робочих параметрів, що регулярно вимірюються, і візуалізації полум'я в реальному часі. Запропоновано та оцінено схему безперервного багатокрокового прогнозування на основі глибокої нейронної мережі з використанням операційних та графічних даних, зібраних у ході великих експериментів. Метод кластеризації [52] застосовується для класифікації різних станів горіння, що дозволяє відрізнити аномальне полум'я від нормального оператора, що не потребує уваги. У разі аномальних станів горіння можна реалізувати сигнали тривоги, щоб попередити оператора про необхідність відрегулювати умови роботи сміттєспалювального заводу так, щоб досягти оптимального стану термічної деструкції.

Метод моніторингу змінних умов горіння пилоподібного палива шляхом поєднання методів цифрової візуалізації полум'я та мережі випадкових ваг пропонується у статті [53]. На основі зображень полум'я, отриманих за допомогою системи цифрової обробки зображень, середні значення інтенсивності компонентів зображення RGB (Red, Green, Blue – червоний, зелений, синій) та дескриптори текстури, обчислені на основі матриці збігу рівнів сірого, використовуються як характеристики кольору та текстури полум'я зображення. Ці характеристики розглядаються як вхідні змінні

запропонованої моделі багаторежимного моніторингу процесу. Розраховуються статистичні дані для відповідних умов експлуатації для виявлення відхилень від норми згоряння. Імовірність успішного розпізнавання умов горіння запропонованою моделлю становить понад 91%, що перевищує інші класифікатори машинного навчання за допомогою скороченого часу навчання. Результати також показують, що в аномальних умовах частоти коливань відрізняються від нормальних, статистика методу здатна виявити такі аномалії.

Дослідження в галузі контролю полум'я представлені також у роботах [56], [57] і спрямовані на створення обчислювальної моделі для онлайн-прогнозу викидів на основі характеристичних параметрів полум'я. Методологія [56] заснована на цифрових зображеннях та спектрометричних методах. В основі багатофункціональної інструментальної системи [57] також лежить візуалізація полум'я. Її здатність забезпечити миттєве та кількісне вимірювання параметрів полум'я в режимі онлайн на основі безперервної дії показали експериментальні результати, отримані з використанням випробувальної установки для спалювання вугілля. Системи [56, 57], складаються з оптичного зонда, цифрової камери, спектрометра та вбудованого комп'ютера з відповідним прикладним програмним забезпеченням. Розроблено комп'ютерні алгоритми для визначення характеристичних параметрів полум'я, включаючи розмір, форму, температуру та спектральні розподіли. Методологія [56] розглянута з прикладу газового котла-утилізатора за умов експлуатації. Отримані результати свідчать про тісну кореляцію між розрахованими параметрами полум'я та умовами роботи котла. Зокрема, радикали полум'я (CN^* і C_2^*) та його співвідношення демонструють тісний зв'язок із співвідношенням повітря-паливо. Спектральні інтенсивності Na (589 нм) та K (767 нм) також ілюструють тісний зв'язок з типом палива .

Основною метою огляду [58] є пояснення трьох методів онлайн-моніторингу, які можуть відображати стан згоряння палива в режимі

реального часу: обробка зображень полум'я, аналіз електричних сигналів та спектральний аналіз. Порівнюється та аналізується вплив додавання біомаси на полум'я пилоподібного вугілля, а також сумуються характеристики викидів забруднюючих речовин з біомаси на основі лужних металів та методи прогнозування викидів на основі полум'я, що забезпечує корисний досвід та теоретичні рекомендації для проектування сполуки біомаси з вугіллям та спалювання.

Як уже зазначалося, оперативна оптимізація згоряння є ефективним інструментом поліпшення роботи котла в умовах, що часто змінюються. У даному випадку онлайн-оптимізація згоряння є більш ефективним і гнучким способом порівняно з автономною оптимізацією і набуває актуальності з появою передових методів вимірювання умов згоряння котлів.

Прогнозування стану згоряння має вирішальне значення для більш глибокого розуміння роботи печі та оптимізації умов експлуатації [54], [55], [59]. Новий відеомоніторинг пропонується в [54], який використовує прогнозування на основі прихованої моделі Маркова та багатофакторного аналізу головних компонентів. Багатофакторний аналіз використовується для отримання взаємної кореляції між просторовими відносинами в низькомірному просторі, у той час як модель Маркова буде тимчасову поведінку послідовності просторових характеристик і може надавати сегменти на основі станів, які дозволяють прогнозним моделям відстежувати сигнали в різні моменти часу. Завдяки прогнозам на майбутнє хід поточної операції можна відстежувати за допомогою простої діаграми моніторингу ймовірності, яка показує виникнення збоїв, що спостерігаються в майбутньому. Для перевірки ефективності запропонованого методу використовується реальна пічна система.

Прогнозування стану згоряння представлено у дослідженні [55] за допомогою моделі навчання з напівконтролем, що поєднує автокодувальник з шумозаглушенням, генеративно-змагальну мережу та класифікатор гауссівських процесів. Автокодувальник із шумозаглушенням створений для

отримання характерних особливостей зображень полум'я за допомогою механізму змагального навчання. Вилучені характеристики потім передаються GPC для прогнозування видимих і невидимих станів згоряння. Ефективність запропонованої моделі напівконтрольованого навчання оцінювалася за допомогою зображень полум'я печі котла, що працює на важкому мазуті потужністю 4,2 МВт, знятих при різних станах горіння. Для станів горіння, що спостерігаються, була досягнута середня точність прогнозування 99,83%. Результати порівняльних досліджень з іншими глибокими нейронними мережами та класифікаторами показали, що запропонована модель забезпечує кращу точність прогнозування та надійність у порівнянні з іншими традиційними моделями прогнозування.

Тема онлайн-прогнозування, зокрема викидів, також отримала розвиток у дослідженні [59] за допомогою глобально розширеної нейронної мережі загальної регресії GE-GRNN (Globally Enhanced General Regression Neural Network) та використовує теорію гаусівського адаптованого резонансу GART (Gaussian Adapted Resonance Theory) як метод поступового навчання для зниження витрат пам'яті на модель викидів GRNN (General Regression Neural Network), яка дуже підходить для великомасштабних обчислень у реальному часі. Наведено три методи: (1) пропонується модифікований метод похитування для динамічного коригування факторів, що згладжують GRNN для поліпшення як глобальних, так і локальних оцінок; (2) у прихованих шарах GRNN розроблено структуру швидкої поліноміальної екстраполяції для покращення якості оцінки екстремальних значень; (3) створюється гібридний механізм оцінки для інтеграції методу похитування та екстраполяції в єдину структуру оцінки. Експерименти з моделювання проводяться з використанням математичних функцій та прогнозування реальних викидів NO_x та втрат при загорянні летючої золи в котлі потужністю 600 МВт.

Оптимальний метод переробки ТПВ представлений у [60]. Він обумовлений організацією процесу піролізу та газифікації у нададіабатичному режимі при відомому складі вихідної сировини і дозволяє отримувати

максимальний обсяг суміші горючих газів при їхній максимальній теплотворній здатності. Оптимальність переробки здійснюється за рахунок введення в систему керування пристрою визначення в режимі реального часу складу газоподібних продуктів реакції, що дозволяє контролювати склад вихідної сировини, що змінюється довільним чином, і на підставі яких установка переводиться в оптимальний режим з новими параметрами [61].

Зі зростанням вимог щодо захисту навколишнього середовища контроль викидів NO_x опинився у центрі уваги всього світу і стикається з величезними проблемами. У Китаї з метою зниження концентрації викидів NO_x національний стандарт викидів NO_x для вугільних електростанцій було обмежено до 50 мг/Нм³ у 2019 році. Як правило у котлах для зниження викидів NO_x використовуються два основні методи: технологія оптимізації згоряння з низьким вмістом NO_x та технологія денітрифікації димових газів. Однак перед оптимізацією необхідно правильно визначити взаємозв'язок між NO_x та відповідними робочими параметрами, такими як подача первинного, вторинного повітря, кисню та вугілля. Тобто спочатку має бути створена модель прогнозування викидів NO_x . Моделі прогнозування вмісту оксидів азоту (NO_x) у викидах представлені в [62], [63], [64]. Нові методи ансамблевого навчання розглядаються у статті [62]. Щоб зменшити надмірні дані та розмірність даних, для вибору вхідних змінних використовується метод вибору функції взаємної інформації. Потім усі вхідні змінні нормалізуються та діляться, щоб підготувати дані для моделювання. Створюються три види окремих моделей: вентильна рекурентна одиниця, надточні нейронні мережі та багатовимірна лінійна регресія, які є базою для методів ансамблевого навчання. У роботі [63] досліджується прогнозування змісту оксидів азоту (NO_x) у викидах шляхом використання близько 17000 зразків, що беруть участь у зборі триденних реальних даних з електростанції зі спалювання відходів. Розроблено гібридну процедуру для вибору відповідних функцій з великих та несинхронізованих даних, за допомогою якої створюється модель на основі дерева рішень підвищення градієнта GBDT (Gradient Boosted

Decision Trees). У [64] представлені дві моделі згоряння котла з удосконаленим контролером рівня викидів NO_x . Перша, математична модель, є опис ключової динаміки термічного коефіцієнта корисної дії (ККД) котла в реальному часі та одномірний розподіл концентрації NO_x у печі при роботі на звичайному паливі та при роботі з надлишковим повітрям. Інша модель, орієнтована на керування, представляє собою модель сірого ящика. Імітаційні дослідження статичних і динамічних властивостей першої математичної моделі показують, що модель може функціонувати як симулятор в реальному часі як для тестування розширених законів керування горінням котла, так і для генерації даних навчання та перевірки моделі сірої скриньки, орієнтованої на керування. Узагальнюються процедура моделювання сірої скриньки, орієнтована на керування, а також додаткова лінійна модель у просторі станів з дискретним часом, щоб полегшити проектування вдосконалених контролерів згоряння на основі моделі.

Як уже зазначалося, викиди від спалювання ТПВ можна скоротити за допомогою первинних та вторинних заходів: оптимізації процесу згоряння та очищення димових газів. У якості альтернативи [65] продемонстровано, що ступінчаста подача палива є ефективним засобом зниження викидів NO_x . Наведено результати експериментальної роботи з дослідження впливу регулювання подачі повітря на викиди від спалювання у невеликих масштабах енергетичних культур. П'ять різних видів палива з біомаси (деревина, верба, міскантус, костриця очеретяна та їжака) спалювалися в невеликому (35 кВт) котлі на біомасі і проводилося три різні випробування, спрямовані на вивчення впливу: (1) співвідношення повітря у первинній камері згоряння (коефіцієнт первинного повітря), (2) температури в первинній камері згоряння і (3) загального коефіцієнта надлишку повітря на викиди NO_x і твердих частинок. Було показано, що за рахунок зміни співвідношення первинного повітря можливе скорочення викидів NO_x на 15–30 %. Для всіх видів палива викиди NO_x та твердих частинок були зведені до мінімуму при коефіцієнті первинного повітря 0,8. Викиди твердих частинок від міскантуса збільшувалися з

підвищенням температури в камері первинного згоряння, викиди NO_x від міскантусу та верби також збільшувалися з підвищенням температури. Загальний коефіцієнт надлишку повітря не впливає на викиди, оскільки для жодного з видів палива не було виявлено суттєвих відмінностей. Викиди твердих частинок та оксидів азоту з широкого спектру сировини біомаси можна звести до мінімуму за рахунок оптимізації співвідношення первинного повітря та підтримки температури у первинній камері згоряння приблизно на рівні $900\text{ }^\circ\text{C}$.

Для чисельного моделювання спалювання в нерухомому шарі [66] біомаси, ТПВ та інших видів палива низької якості представлена каскадна модель реактора, яка здатна відтворювати ключові величини, такі як час затримки займання, швидкість займання, швидкість фронту реакції та швидкість конверсії маси, близькою відповідно до експериментальних даних. Перевірка моделювання представлена для лабораторних та стендових експериментів, а також для промислової печі для спалювання ТПВ.

Для забезпечення стабільної роботи печі на вологому паливі розроблено опосередкований метод оцінки вологості палива на основі теплового балансу конденсаційного економайзера димових газів [67]. Розроблений метод реалізований у блоці автоматичного керування піччю для оцінки вмісту вологи в сировині та прогнозного коригування параметрів печі для оптимального згоряння палива. Непрямий метод, заснований на використанні теплового балансу економайзера, був експериментально апробований на печі колосникової потужністю 6 МВт, що працює на біомасі з вологістю 37, 46, 50, 54 і 60%.

Традиційних засобів теорії керування в більшості випадків недостатньо для реалізації технології двоступеневого піролізу [68, 69]. Додаткові труднощі створює зміна складу вхідних відходів, а також їх вологості в процесі роботи піролізної установки. Як показує низка сучасних досліджень, для автоматизації складних теплоенергетичних і хімічних об'єктів для підвищення ефективності їх роботи та надійності в багатьох випадках необхідна розробка

нових методів керування [70-72]. Крім того, передові дослідження підтверджують, що принципи інтелектуального керування можуть досить ефективно застосовуватися для автоматизації складних установок такого типу [73-75], а саме: для керування нелінійними та нестационарними установками, характеристики яких можна визначити лише наближено, а параметри можуть змінюватися випадковим чином, найбільш доцільним є використання систем на основі нечіткої логіки [76-78]. Наведені нечіткі системи дозволяють ефективно використовувати експертну інформацію та експериментальні дані, реалізовувати складні та гнучкі стратегії керування та прийняття рішень, мають високу логічну прозорість та інтерпретативність, а також можуть ефективно навчатися, як нейронні мережі на основі навчальних вибірок або цільових функцій [79-81]. Тому доцільно здійснити створення перспективних систем керування піролізними установками, що працюють в умовах зміни складу та вологості вхідних ТПВ, заснований на принципах нечіткого керування.

На сьогодні проведено ряд досліджень, присвячених різним технологіям утилізації ТПВ за допомогою піролізу, а також автоматизації установок і технологічних комплексів для їх реалізації [82, 83]. У свою чергу, у роботах [84, 85] представлено різноманітні алгоритмічні та схемотехнічні рішення, а також розроблені програмно-апаратні засоби, що дозволяють автоматизувати як окремі контури, так і цілі піролізні установки утилізації ТПВ.

Крім того, достатня увага приділяється розробці та дослідженню математичних та імітаційних моделей різноманітних піролізних установок та їх окремих компонентів (реакторів, циркуляційних систем, теплообмінників тощо) [86-89], у тому числі з використанням нечіткої логіки, м'якого обчислення та інших інтелектуальних технік [90, 91]. Також на даний час наведено достатню кількість прикладів успішного застосування інтелектуальних та інших прогресивних алгоритмів і пристроїв для реалізації ефективного керування окремими технологічними змінними сміттеутилізуючих комплексів [92, 93]. Зокрема, запропоновано нечіткий

самонастроювальний ПД [94], робастний [95], модельно-еталонний адаптивний [96] та інші типи регуляторів [97].

Використання ТПВ відіграє велику роль в енергетичній системі. Спалювання на решітці є технологією, що найчастіше використовується для цієї мети. Однак, як уже зазначалося, через різні властивості ТПВ (зміст вологи, зольності, хімічного складу тощо) та проблем, пов'язаних із золою (наприклад, засмічення теплообмінників), контроль за рівнем викидів забруднюючих речовин утруднений і, таким чином, є предметом постійних досліджень та розробок [98], [99], [100]. З точки зору теорії систем, гратчастий котел на біомасі є нелінійною багатопараметричною системою. Однак у сучасних контролерах нелінійності та зв'язку не враховуються. Нині контролери налаштовуються експериментально і з кількома незалежними контурами керування, тобто зв'язком між відповідними контурами зворотного зв'язку нехтують. Через ці спрощення при високій ефективності не завжди досягається мінімальна кількість викидів. У новій стратегії керування гратчастими котлами [98] для проектування контролера використовується нелінійна модель просторів станів, що описує основну поведінку котла. За допомогою цієї моделі спроектована динаміка зворотної системи, що є основною частиною внутрішнього керування моделлю з використанням властивості диференціально плоских систем. Через вхідну затримку часу, зворотна система визначається тільки для трьох каналів введення-виведення. Однак стабілізація динаміки зворотної системи є складним завданням. Запропоновано метод стабілізації за допомогою вхідного сигналу із затримкою за часом та надано аналіз стійкості. Нова стратегія керування має лише три параметри, які необхідно налаштувати, що є значним зниженням складності порівняно з існуючими підходами. Модель згоряння колосникової печі середнього масштабу [99] та модель згоряння невеликого котла [100] на біомасі отримані на основі пілотної печі дослідницького центру БІОЕНЕРГІЯ 2020+. У дослідженні [99] експерти розглядають два абсолютно різних режими горіння: протиточне горіння на колосникових ґратах з займанням у верхній

частині шару і прямоточне з займанням в нижній частині шару. Динамічне поведінка зовсім по-різному протитоку і прямотоку. В основу моделі покладено два масові баланси води та сухого палива. Нова модель дуже проста і складається всього з двох звичайних диференціальних рівнянь, що робить її особливо придатною як основу для стратегій керування на основі моделей. У [100] з істема описується нелінійною моделлю простору станів п'ятого порядку, а проєктування блоку керування виконано на основі лінеаризації введення-виведення з оцінками змінних станів за допомогою розширеного фільтра Калмана.

Як зазначалося, викиди від спалювання є важливою причиною забруднення довкілля. Цю проблему успішно вирішується з використанням технології спалювання в циркулюючому псевдозрідженому шарі. Слушна температура шару з мінімальними коливаннями має важливе значення для оптимальної роботи такого типу котлів. Розробка точної моделі для прогнозування температури шару є рішенням, яке принесе користь підтримці такої температури в певному стійкому діапазоні і може надати оціночні сигнали для розробки стратегії керування; крім того, цю модель можна використовувати як основу щодо оптимізації процесу. У дослідженні [101] представлена динамічна модель для прогнозування температури шару котла зі спалюванням у псевдозрідженому шарі, що циркулює, потужністю 300 МВт на основі методу опорних векторів найменших квадратів з реальними експлуатаційними даними. Швидкість подачі вугілля та швидкість первинного повітря обрані як незалежні змінні. Поточні значення та попередні послідовності змінних розглядаються як входні дані моделі для опису динамічних характеристик температури пласта. Крім того, попередні значення температури шару приймаються як зворотний зв'язок і потім додаються у входні дані. Метод оптимізації рою частинок використовується визначення оптимальних порядків затримки. Також обговорюються та порівнюються кілька зразків моделей. Результати порівняння показують, що модель може забезпечити точний прогноз температури псевдозрідженого шару.

Останнім часом алгоритми штучного інтелекту широко застосовуються для моделювання, прогнозування та оптимізації складних процесів. Процеси термічної деструкції ТПВ складні через гетерогенний і невизначений склад палива та безліч хімічних речовин, що беруть участь у реакціях. У процесі згоряння традиційний метод керування горінням у печі не може задовольнити вимоги керування при частих змінних навантаженнях. Машинне навчання є перспективним інструментом моделювання термохімічних процесів з невизначеним та гетерогенним паливом. Дослідження з управління процесом згоряння котла з метою підвищення ефективності термічної деструкції та економічних показників представлені у статті [102] у вигляді інтелектуального алгоритму оптимізації ключових параметрів в системі керування горінням із змінною межею бі-подвійного перетину. Цільова функція будується на основі коефіцієнта надлишку повітря та сигналу відхилення основного тиску пари. Генетичний алгоритм застосовується для оптимізації коефіцієнтів усунення досягнення кращих характеристик управління. Результати моделювання показують, що представлений метод дозволяє ефективно підвищити швидкість спрацьовування та зберегти коефіцієнт надлишку повітря в оптимальному інтервалі горіння.

Новий підхід в автоматизації керування з метою вирішення проблеми його багатопараметричного управління представлений в [103]: МІМО (Multiple Input Multiple Output)-моделювання та багатоконтурне управління моделі керованого об'єкта на основі нейронної мережі, де пропонується керована даними модель з кількома входами та кількома виходами (МІМО) та багатоконтурний ПД- регулятор. По-перше, для аналізу взаємозв'язку між змінною і контрольованою змінною процесу термічної деструкції ТПВ використовується метод вибору ознак, заснований на коефіцієнті кореляції Пірсона і експертних знаннях. По-друге, нечітка нейронна мережа МІМО Такагі-Сугено, заснована на багатозадачному навчанні, призначена для побудови багатоваріантної моделі керованого об'єкта. По-третє, створюється багатоконтурний ПД-регулятор на основі квазідіагональної рекурентної

нейронної мережі, який має канал самозворотного зв'язку та канал зв'язку і може автоматично регулювати параметри управління. Далі стійкість стратегії керування доводиться другим способом Ляпунова. Зрештою, ефект моделювання та ефективність управління підтверджені під час симуляційних експериментів на основі реальних даних процесу спалювання ТПВ.

Алгоритми штучного інтелекту використовують такі методи, що імітують поведінку природних істот. Біоміметичні підходи на основі рою стали використовуватися для оптимізації горіння, зокрема алгоритм штучної бджолої родини ABC (Artificial Bee Colony Optimization), який розроблений шляхом вивчення поведінки бджіл під час пошуку нектару. У [104] пропонується система оптимізації згоряння для онлайн-додатків, заснована на покращеному алгоритмі штучної бджолої сім'ї з методом моделювання на основі покращеної нейронної мережі загальної регресії (Enhanced-GRNN), яка розроблена з використанням теорії гаусівського адаптивного резонансу (GART) та поліноміальної екстраполяції для підвищення продуктивності в режимі онлайн та отримання екстремальних значень. Потім пропонується два вдосконалення класичного алгоритму ABC: багатосегментний метод оцінки якості джерел живлення на зайнятій бджолиній фазі, що ґрунтується на аналізі ймовірнісного розподілу продуктів на різних сегментах ітерації; і стратегія, заснована на пам'яті, що дозволяє бджолам-спостерігачам знаходити нові продукти та оцінювати їх якість, враховуючи кращі напрямки та кроки руху. У дослідженні [104] також було розроблено функцію витрат з урахуванням факторів споживання вугілля, викидів NO_x та потенціалу переробки летючої золи.

Розуміння поведінки біомаси в процесі згоряння є ключовим фактором при проектуванні та вдосконаленні систем спалювання. Методи обчислювальної гідродинаміки CFD (Computational Fluid Dynamics) стали ефективними інструментами в пошуках кращого розуміння явищ термічного перетворення біомаси [105], [106], [107]. У статті [105] представлена перехідна модель для моделювання згоряння біомаси в котлі з нерухомим шаром. Цей

метод поєднує в собі класичні методи CFD, які використовуються для моделювання газової фази, з набором змінних ейлерів, визначених для моделювання твердої фази, і лагранжовими траєкторіями, які моделюють падіння частинок. Для моделювання численних процесів, що відбуваються під час горіння твердої фази, реалізовано кілька підмоделей. Ці підмоделі включають термічне перетворення біомаси, тепло- та масоперенесення, усадку частинок та ущільнення шару, а також взаємодію траєкторій дискретної фазової моделі та змінних шарів. Ці прогнози протиставляються різним експериментальним тестам, які дають досить хороші результати та демонструють загалом хорошу поведінку моделей. Моделювання полегшує розуміння теплопередачі всередині котла та нестабільності вимірів викидів.

Імітаційні моделі великомасштабної камери згоряння з рухомими ґратами для біомаси та ТПВ, засновані на CFD, ще недостатньо вивчені. У [106] пропонується ефективний метод розрахунку, у якому 2D-модель шару поєднується з 3D-моделлю стаціонарної печі. У новому підході модель шару включає в себе нестационарне моделювання двох рідин з використанням реалістичної геометрії решітки, вирізаної горловиною печі, що включає динамічний зв'язок тепло-і масообміну між паливним шаром і нижньою камерою згоряння. Змодельовані профілі верхньої частини шару потім використовуються як умови на вході для запуску тривимірного стаціонарного моделювання турбулентного згоряння газу для всієї печі. Крім того, досліджується вплив розміру частинок, пропускної спроможності відходів та часу перебування на ефективність спалювання у шарі. Загалом, поточний обчислювальний метод значно підвищує ефективність моделювання промислових пальників з рухомими ґратами.

Метод [107] оптимізації згоряння в надкритичному котлі розроблений на основі моделей штучних нейронних мереж (ШНМ), які створюються для прогнозування роботи котла та характеристик викидів. Щоб покращити узагальнення моделей ШНМ, виконується моделювання обчислювальної гідродинаміки (CFD) для створення деяких даних як навчальних вибірок для

моделювання ШНМ разом з експлуатаційними даними. Вхідними даними моделей ШНМ є питоме навантаження, властивості вугілля, надлишок повітря та схема розподілу повітря, а вихідними даними є тепловий ККД та викиди NO_x . На основі моделей ШНМ генетичний алгоритм використовується для оптимізації схеми розподілу повітря для одночасного досягнення вищого теплового ККД та зниження викидів NO_x . Прогнози термічного ККД та викидів NO_x добре узгоджуються із заводськими даними із середніми помилками 0,04% та 3,56 мг/Нм³ відповідно. Результати показують (демонструють), що використання даних CFD може допомогти узагальнити моделі ШНМ. Застосування на практиці показує, що запропонований підхід є ефективним інструментом для багатоцільової оптимізації продуктивності котла з поліпшеним тепловим ККД і контролем викидів NO_x .

Запропонований в [108], [109] в реальному часі метод заснований на ізоентальпійності процесу піролізу для визначення елементного складу, який інтегрований в автоматизовану систему управління. Розрахунок складу продуктів згоряння ведеться на основі умовної формули палива, що включає пальне та окислювач. З кількісного співвідношення речовин, що утворюються внаслідок згоряння, визначається склад суміші газів. Математичну модель аналізованого методу визначають наступні рівняння: хімічної рівноваги для кожної з цих речовин; закону мас, що діє; закону збереження енергії; закону Дальтона. Відносні похибки обчислень відповідно до еталонних даних [110] <10%, що відповідає допустимій точності інженерних розрахунків.

Подальший розвиток математична модель для ідентифікації умовної формули отримала у роботі [111, 112, 113] і послужила основою єдиної моделі ідентифікації складу вуглеводневих сполук у різних агрегатних станах як єдиної моделі ідентифікації складу продуктів спалювання, газифікації та піролізу.

У літературних джерелах [114, 115, 116] зазначається, що в спалюванні першорядне значення має правильне проведення процесу, що максимально сприяв повному спалюванню. Підтримання оптимальних параметрів

спалювання істотно впливає на скорочення викидів органічних речовин в атмосферу. Параметром, який добре характеризує «оптимальні умови спалювання», є концентрація монооксиду вуглецю в димових газах. Іншими параметрами, що визначають «хороші умови спалювання», є, перш за все, температура, турбулентність та час перебування димових газів за відповідної температури. У літературних джерелах [9], [117] показано, що сортування сировини із заданими характеристиками через ідентифікацію та класифікацію дозволяє провести послідовність проведення сортування промислових обсягів ТПВ, проте не наводиться правило ухвалення рішення на формування структури технічних засобів з метою переробки ТПВ. Актуальність вирішення цього питання підтверджує аналіз спеціалізованих досліджень у [114, 115, 116].

Аналіз представленої матеріалу свідчить, що автоматизація технологічних процесів термічної деструкції ТПВ є ключовим напрямом підвищення ефективності утилізації відходів. Застосування сучасних моделей і методів автоматизації дозволяє:

- Підвищити точність керування технологічними параметрами (температура, подача палива, контроль складу відходів), що забезпечує безперервний і стабільний режим роботи обладнання.
- Оптимізувати енергетичні витрати та підвищити вихід кінцевих продуктів із високою теплотворною здатністю.
- Зменшити шкідливий вплив на довкілля за рахунок мінімізації викидів токсичних речовин, зокрема оксидів азоту, вуглецю та кислотних газів.
- Інтегрувати інтелектуальні технології (штучний інтелект, нечітка логіка, нейронні мережі) для прогнозування станів процесів і вдосконалення алгоритмів керування.
- Розробити адаптивні системи сортування ТПВ за їх хімічним складом, що дозволяє ефективніше організувати термохімічну переробку вихідної сировини.

Таким чином, удосконалення АСК термічними процесами деструкції ТПВ, засноване на інтеграції новітніх математичних моделей, інформаційних технологій та екологічних вимог, є перспективним шляхом для підвищення ефективності утилізації ТПВ. Особливу увагу слід звернути на важливість автоматизації та інноваційного підходу до сортування ТПВ як передумови для екологічної та економічної ефективності процесів термічної деструкції.

1.3 Висновки до розділу

1. Для підвищення ефективності методів термічної деструкції твердих побутових відходів з дотриманням екологічних показників необхідно провести подальші дослідження в галузі автоматизації сортування ТПВ. Зокрема, слід забезпечити класифікацію відходів за групами з характерним хімічним складом, з обов'язковим виділенням груп, що утворюють кислі гази. Властивість ідентичності бруто-формул вихідної речовини та продуктів реакцій може стати основою методу визначення складу вуглеводневих речовин при сортуванні ТПВ на основі термохімічної переробки досліджуваної порції сировини.

2. Сортування ТПВ через ідентифікацію та класифікацію сировини із заданими характеристиками дозволить провести ефективну обробку промислових обсягів ТПВ. Для цього необхідно сформулювати критерії прийняття рішень щодо вибору найбільш ефективного та екологічно безпечного способу термічної деструкції. Додатково слід розробити оптимальну структуру технічних засобів, яка забезпечить реалізацію обраного методу з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ І МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО СОРТУВАННЯ ДЛЯ ПОДАЛЬШОЇ ПЕРЕРОБКИ МЕТОДАМИ ТЕРМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ.

Метою розділу є розв'язання задачі з розробки імітаційної моделі з правилами прийняття рішення для формування структури технічних засобів для автоматизованого методу сортування ТПВ за групами з заданим хімічним складом із сировинної суміші для подальшої їхньої переробки ефективними методами термічної деструкції з дотриманням екологічних показників.

Для розв'язання поставленої задачі необхідно:

- розглянути метод класифікації та модель ТПВ та спосіб їхньої ідентифікації, який дозволяє виділяти групи, що утворюють кислі гази, і на цій основі прийняти імітаційну модель твердих побутових відходів;
- розробити метод сортування ТПВ для подальшої переробки кожної групи з максимальною ефективністю та дотриманням екологічних показників;
- розробити імітаційну модель процесу очищення отриманих вуглецево-водневих газів із класифікованих ТПВ;
- сформулювати правило прийняття рішення по використанню відомих методів термічної деструкції для формування структури технічних засобів для переробки ТПВ;
- розробити комплексну технологічну схему методу термічної деструкції, яка забезпечує дотримання екологічних норм на викиди до навколишнього природного середовища, при використанні вторинних енергетичних ресурсів, отриманих з ТПВ.

Вирішення поставлених питань є актуальним напрямом у сучасних дослідженнях. Склад промислових обсягів ТПВ є випадковим набором гомогенних та гетерогенних речовин з відомими властивостями. Такий стан речей унеможливує пряме використання ТПВ як сировини для будь-якої технології термічної деструкції без додаткового обліку двох аспектів. По-

перше, для застосування промислових обсягів ТПВ як сировини для технологій термічної деструкції необхідно розглянути способи подрібненого сортування відходів з одночасним проведенням ідентифікації за прийнятими класифікаційними ознаками. По-друге, необхідно прийняти критерії, на підставі яких за результатами сортування використовувати доцільний метод термічної деструкції ТПВ та відповідний метод автоматичного керування таким процесом.

Тенденцією розвитку сучасної цивілізації є раціональне використання природних ресурсів та захист навколишнього середовища. Але одночасно з цим зростає й споживча здатність населення, яка характеризується високою якістю життя, що є одним із головних факторів накопичення ТПВ. Особливістю нинішніх відходів високотехнологічних виробництв сьогодення є їхня низька швидкість біохімічного розкладання. Наприклад, інтервал часу повного розкладання більшості пластмас і композитних вуглепластиків становить сотні років, єдиний природний процес, що дозволяє прискорити цей термін, є сонячна інсоляція [117].

У світі немає жодної розвиненої країни, де проблема накопичення та переробки ТПВ повністю вирішена. Метою економічно розвинених індустріальних країн є екологічність у керуванні побутовими відходами при їх переробці та усунення їх як забруднювачів екосистеми через їхнє перетворення на джерело нескінченної вторинної сировини.

При виборі системи вторинного використання ТПВ насамперед визначають ефективні технології систем збирання та сортування, транспортування та переробки відходів, які у свою чергу залежать від хімічного складу матеріалів та їхніх фізичних властивостей.

На даний час у більшості випадків до найбільш застосованих способів переробки відходів відносять: природне розкладання в навколишньому середовищі; поховання на полігонах ТПВ; сортування та вторинна переробка [117].

При застосуванні такого методу, як сортування, використання автоматизованих процесів на сміттєпереробних підприємствах та вибір оптимального обладнання, призначеного для роботи з відходами, дає можливість переробити до 55% ТПВ, тоді як ручний відбір передбачає переробку трохи більше 5% відходів.

Наявність автоматизованих ліній дозволяє значно підвищити швидкість переробки, відсоток та якість відібраних корисних фракцій, готових до вторинного використання.

Методи сортування відходів та виділення з них матеріальних ресурсів поділяють за способом попередньої підготовки відходів (з дробленням і без нього) та за характером поділу (механічна, повітряна, гідравлічна, магнітна сепарація).

У процес сортування може бути залучено наступне обладнання: конвеєрне обладнання; оптичні сканери; пневматичні установки; магнітні, балістичні, барабанні, роторні та вихрострумові сепаратори; подрібнювачі, дробарки, шредери; пресувальне обладнання для відібраної вторинної сировини та відходів сортування.

Основними методами сепарації ТПВ є:

- магнітна сепарація – застосовується виділення феромагнітних об'єктів (наприклад, сталевих консервних банок);
- електродинамічна сепарація – комбінований процес магнітного збагачення (вилучення діа- та парамагнітних компонентів, наприклад, алюмінієвих банок);
- електросепарація – застосовується для вилучення з ТПВ відпрацьованих ртутних ламп, металовмісних пластмасових відходів, електронного брухту, електрокабельного брухту тощо;
- аеросепарація – процес збагачення в газовому (повітряному) середовищі, що рухається, заснований на використанні відмінностей у щільності компонентів та їхньої швидкості вітання, при збагаченні ТПВ застосовують для поділу потоку відходів на легку й важку фракції, а також для

виділення горючих компонентів для подальшої термічної переробки. Аеросепарація переважно використовується для виділення плівки.

Комплектація конкретної лінії залежить від багатьох факторів: кількості запланованих обсягів відходів, що надходять, та їхньої морфології, територіального розташування самого комплексу, затребуваності вторсировини тощо. Таким чином, технологічний процес автоматичних ліній сортування відходів, контрольований операторами, здійснює контроль кількості та якості відібраної вторсировини, придатної для подальшої переробки.

Аналіз безлічі способів вторинної переробки ТПВ дозволив дійти висновку, що з усіх застосованих технологій високі споживчі властивості демонструє термічна деструкція за критерієм ефективність. Головними перевагами такої технології є: ефективне знешкодження відходів в тому числі повне знищення патогенної мікрофлори; зменшення обсягу відходів на один порядок по масі; використання енергетичного потенціалу відходів органічного походження[118].

Крім того, термічна деструкція відповідає вимогам бізнес-технологій, а саме: виробництву максимальної кількості цінного кінцевого продукту та забезпеченню мінімальної кількості викидів у навколишнє природне середовище шкідливих речовин. У практиці термічної деструкції найбільшого поширення набули чотири способи термохімічного перетворення ТПВ: спалювання, газифікація, піроліз та термічна модифікація. Піроліз, своєю чергою, ділиться на повільний і швидкий [117].

Кожна технологія передбачає свою мету. При спалюванні сировини визначається можливість максимального тепловиділення шляхом виключення недопалу вихідної сировини чи подачі надлишку повітря. Метою газифікації є мінімізація енергетичних витрат на процес перетворення сировини за умови отримання суміші горючих газів максимально можливої теплотворної здатності. Для організації процесу піролізу сировини потрібно підведення енергії у формі тепла й відсутність повітря або окисних газів. Як продукт

процесу піролізу виступають вуглисті залишок, конденсуються речовини й неконденсовані гази. Слід зазначити, що будь-яка технологія термічної деструкції для забезпечення заданих екологічних та технічних показників ефективності вимагає сталості та визначеності складу сировини, що переробляється [111].

2.1 Формування імітаційної моделі ТПВ

Для можливості використання ТПВ як сировини в технологіях термічної деструкції було проаналізовано їхній склад. Слід зазначити, що різні дослідження, проведені за останні п'ять років, показали суттєво відмінні результати.

2.1.1 Метод класифікації ТПВ та спосіб їх ідентифікації

Результати досліджень [117] виявили, що морфологічний склад ТПВ для України в 2018 році становив: харчові відходи – 54,2%, папір та картон – 16,3%, деревина – 3,5%, метали – 4,2%, текстиль – 6,7%, скло – 4,3%, пластмаса – 6,3%. Морфологічний склад ТПВ альтернативних досліджень наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Морфологічний склад ТПВ за даними [117]

Склад за масою, %													
Харчові відходи та залишок органіки	Папір та картон	Упаковка	ПЕТФ тара	Чорні метали	Кольорові метали	Текстиль	Скло	Деревина	Шкіра, гума	мін. залишок	Пластмаса	Полімерна плівка	Небезпечні ТПВ
53,68	14	0,96	2,09	0,94	0,17	2	13	1	1	4,31	3	2,09	0,02

Наведені результати досліджень однозначно дозволяють зробити висновок, що склад з високим ступенем ймовірності носить випадковий

характер розподілу, а тим більше кількість морфологічних груп теж носить випадковий характер. Слід зазначити дослідження [9, 117] де пропонується принцип класифікації ТПВ за чотирма групами на основі умовної формули речовини або бруто-формули.

Для імітаційного моделювання різних морфологічних груп ТПВ умовною формулою було розглянуто моделі, основою яких є відомі масові або об'ємні частини складових органічних сполук, а також їхні хімічні формули. Незважаючи на різноманітність органічних речовин та сполук, їх можна описати за допомогою єдиної моделі.

Класифікаційною ознакою стала кількість атомів (C, H, O, N) в органічній сполуці, яка властива тим чи іншим видам ТПВ. До першої групи потрапили відходи, які умовно можна зарахувати до вуглеводневих. Основу таких ТПВ складають насамперед поліетиленова плівка, поліпропіленові та поліестерові елементи штучних конструкцій. До другої групи потрапили відходи вуглеводневі, кисневмісні. Основу таких ТПВ становить насамперед папір, картон, деревина, ПЕТФ тара, штучний текстиль (тріацетат целюлози та віскоза). До третьої групи були віднесені вуглеводневі відходи, що містять, кисень та азот. Основу таких ТПВ складають насамперед білкові відходи, нейлон, шерсть, шкіра. До четвертої групи були віднесені вуглеводневі відходи, що містять активні елементи (F, Cl, S). Основу таких ТПВ складають насамперед поліхлорвінільні та вінілові денфторидні елементи конструкцій, гума.

У роботі [9, 117] було узагальнено результати різних морфологічних класифікацій і на основі запропонованої імітаційної моделі отримано класифікацію за характерним хімічним складом.

З погляду промислової технології необхідно розділити дискретний обсяг ТПВ, класифікований за критеріями відповідно до хімічного складу. Процес упорядкування дискретного обсягу ТПВ ґрунтується на тому, що в будь-якому постійному мінімальному обсязі ідентифікується хімічний склад. Кількісний склад аналізованого обсягу ТПВ визначається інтенсивністю сигналу який

отримано з вимірювача, зміна якого фіксується інструментально. Кількісний аналіз може бути проведений фізичними, хімічними методами та на автоматичних аналізаторах методом «експрес-гравіметрії».

2.1.2 Модель процесу термічної деструкції

Незважаючи на таке різноманіття горючих речовин, процес утворення продуктів термічної деструкції і визначення їхньої температури може бути описаний за допомогою моделі у вигляді брутто-формули. Визначимо модель процесу термічної модифікації на прикладі штучного текстилю (найлон-66) умовна формула якого $(\text{C}_{\text{H}_{1,8332}\text{O}_{0,166}\text{N}_{0,166}})_n$, що включає до свого складу атоми [C], [H], [N], [O]. Він є характерним представником ТПВ широкого класу органічних відходів, склад яких можна представити у вигляді сполук наступних комбінацій елементів: перша – [C], [H]; друга – [C], [H], [O]; третя – [C], [H], [N], [O]. Виявлення та відокремлення таких сполук дозволить отримати залишок, складовими елементами якого є характерні активні елементи [F], [Cl] і [S], що трапляються в ТПВ.

Так, додаткове врахування активних елементів [F], [Cl] і [S], що трапляються в ТПВ, дозволяє змодельовати майже всі органічні сполуки, які можна ізоентальпійно розкласти або спалювати з недоліком чи надлишком повітря атмосфери. Виходячи з умов побудови моделі, немає необхідності враховувати структуру даної речовини. У цьому випадку умовна формула пального має вигляд:

$$C_{b_C} H_{b_H} N_{b_N} O_{b_O} \quad (2.1)$$

де b_C, b_H, b_O, b_N – кількість відповідних атомів в умовній формулі ТПВ.

У якості окиснювача розглянемо повітря. Реакції термічної деструкції не обов'язково проводиться в стехіометричному співвідношенні. Це враховується введенням коефіцієнта надлишку окиснювача α , і всі співвідношення реакцій будуються з використанням мольного коефіцієнта співвідношення компонентів

$$\chi^w = \alpha \cdot \chi_0^w \quad (2.2)$$

Саме не стехіометрична термічна деструкція ТПВ дозволяє змінювати концентрації газів, що утворюються і тим самим забезпечити надмірність даних при вимірюванні для аналізу поточної речовини [119]. У загальному вигляді для довільного ТПВ, що спалюється в повітрі, умовна формула ТПВ буде мати вигляд

$$C_{b_C} H_{b_H} N_{(b_N + \alpha \cdot \chi_0^w \cdot 1.518)} O_{(b_O + \alpha \cdot \chi_0^w \cdot 0.419)} \quad (2.3)$$

Перелік речовин та іонів, які можуть утворитися в процесі термічної деструкції ТПВ:

$$[CO], [CO_2], [H_2], [O_2], [H_2O], [OH], [N_2], [NO], [C], [H], [O], [N] \quad (2.4)$$

Визначення складу продуктів згоряння полягає в знаходженні кількісного співвідношення газів з цього переліку. Кількість невідомих в моделі визначається переліком речовин.

При варіюванні коефіцієнта надлишку окиснювача α буде змінюватися кількість і склад речовин, які утворюються. До складу продуктів згоряння можуть входити й інші більш складні речовини, але за будь-якої величини α їхня кількість буде значно меншою. Тому в розрахунках вони не беруться до уваги. Таким чином, у (2.4) наведено перелік речовин, що охоплює практично важливі випадки.

Розглянемо рівняння хімічної рівноваги для речовин зі списку (2.4). Їхній перелік наведено в таблиці 2.2.

Для рівнянь, що наведені в таблиці, можна записати закон діючих мас, який становить відношення парціальних тисків [9, 109]. При використанні парціальних тисків речовин додатково було введено ще одну змінну M_F – кількість розглянутих молей палива. Таким чином, всього модель включає 13 невідомих величин: 12 парціальних тисків газів (2.4) в продуктах згоряння і число молей M_F кількості палива, що розглядається.

Таблиця 2.2.

Основні рівняння хімічної рівноваги залежних речовин [9]

1	$\text{CO} \leftrightarrow \text{C} + \text{O}$
2	$\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{C} + 2\text{O}$
3	$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{H} + \text{O}$
4	$\text{OH} \leftrightarrow \text{H} + \text{O}$
5	$\text{H}_2 \leftrightarrow 2\text{H}$
6	$\text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{O}$
7	$\text{N}_2 \leftrightarrow 2\text{N}$
8	$\text{NO} \leftrightarrow \text{N} + \text{O}$

Перші вісім рівнянь моделі будуть представлені парціальними тисками продуктів згоряння через закон діючих мас для реакцій з таблиці 3:

$$\frac{P_C \cdot P_O}{P_{CO}} = K_{CO}(T); \quad (2.5)$$

$$\frac{P_C \cdot P_O^2}{P_{CO_2}} = K_{CO_2}(T); \quad (2.6)$$

$$\frac{P_H^2 \cdot P_O}{P_{H_2O}} = K_{H_2O}(T); \quad (2.7)$$

$$\frac{P_H \cdot P_O}{P_{OH}} = K_{OH}(T); \quad (2.8)$$

$$\frac{P_H^2 \cdot P_O}{P_{H_2}} = K_{H_2}(T); \quad (2.9)$$

$$\frac{P_O^2 \cdot P_O}{P_{O_2}} = K_{O_2}(T); \quad (2.10)$$

$$\frac{P_N^2 \cdot P_O}{P_{N_2}} = K_{N_2}(T); \quad (2.11)$$

$$\frac{P_N \cdot P_O}{P_{NO}} = K_{NO}(T). \quad (2.12)$$

Константи хімічної рівноваги представлені в табличному виді у відповідних довідниках і в розрахунках для відповідної температури можуть бути обрані або розраховані за допомогою апроксимаційних поліномів. Крім того, вони можуть бути розраховані на основі ентальпій і ентропій утворення речовин, що входять у реакції, які розглядаються, і які, у свою чергу, також представлені в табличному виді або можуть бути розраховані на основі апроксимаційних поліномів [110].

Наступні 4 рівняння було складено на основі закону збереження речовини у вигляді рівності кількості атомів відповідного хімічного елемента в паливі та продуктах згоряння. Кількість атомів в паливі розрахуємо на підставі виразу (2.3) з урахуванням кількості розглянутих його молекул M_F

$$\text{для [C]} \quad b_C \cdot M_F = P_{CO} + P_{CO_2} + P_C; \quad (2.13)$$

$$\text{для [H]} \quad b_H \cdot M_F = 2 \cdot P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{H_2} + P_H; \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \text{для [O]} \quad (b_O + \alpha \cdot \chi_0^W \cdot 0.419) \cdot M_F = P_{CO} + 2 \cdot P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + \\ 2 \cdot P_{O_2} + P_{NO} + P_O; \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\text{для [N]} \quad (b_N + \alpha \cdot \chi_0^W \cdot 1.581) \cdot M_F = 2 \cdot P_{N_2} + P_{NO} + P_N. \quad (2.16)$$

Для замикання системи в основу останнього рівняння приймемо закон Дальтона, що виражає рівність суми парціальних тисків продуктів згоряння тиску в топці парового котла P_Σ :

$$P_\Sigma = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + P_{H_2} + P_{O_2} + P_{N_2} + P_{NO} + P_C + P_H + P_O + P_N. \quad (2.17)$$

Записана модель є системою нелінійних алгебраїчних рівнянь. Для її вирішення було використано метод Ньютона, який полягає в лінеаризації рівнянь системи і рішення їх щодо поправок невідомих величин. Особливістю системи, отриманої в процесі лінеаризації, є її погана обумовленість. Це викликано дуже малою величиною деяких членів (парціальних тисків) і

великою різницею в величинах між ними, яка може досягати 10...15 порядків. Це веде до нестійкості і великої похибки рішення.

Для підвищення точності вихідну систему рівнянь (2.5 – 2.17) було прологарифмовано. Це призвело до того, що члени модифікованої таким чином системи залишаються нелінійними, але будуть відрізнятися між собою не більше ніж в 10...15 разів. Але такий підхід не вирішує повністю проблему великої різниці між членами рівнянь системи, яку піддано лінеаризації. При лінеаризації, що проводиться звичайним чином, з використанням в якості аргументів шуканих величин (парціальних тисків продуктів згоряння), для яких будуть визначатися поправки. Отже, вони можуть різнитися між собою на ті ж 10...15 порядків. Для уникнення цього, в якості аргументів, при диференціюванні було використано логарифми шуканих аргументів (парціальних тисків і величини M_F) [8], [10], [108]. Для пояснення перетворень розглянемо рівняння (6). Після логарифмування маємо:

$$\ln(P_C) + 2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) = \ln(K_{CO_2}(T)), \quad (2.18)$$

Після лінеаризації:

$$1 \cdot \Delta[\ln(P_C)] + 2 \cdot \Delta[\ln(P_O)] - 1 \cdot \Delta[\ln(P_{CO_2})] = (-1) \cdot \{\ln(P_C) + 2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) - \ln[K_{CO_2}(T)]\}^\circ, \quad (2.19)$$

Тут верхній індекс $^\circ$ показує, що вираз в фігурних дужках є початковим наближенням.

Щоб трохи знизити громіздкість записів, в подальшому, вираз виду $\Delta[\ln(P_O)]$ буде представлено, як Δ_O , а, наприклад, $\Delta[\ln(P_{CO_2})]$, – як Δ_{CO_2} .

Перетворивши описаним способом вихідну систему (2.5 – 2.17), отримаємо систему рівнянь, над якою проведено лінеаризацію:

$$1 \cdot \Delta_C + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{CO} = (-1) \cdot \{\ln(P_C) + \ln(P_O) - \ln(P_{CO}) - \ln[K_{CO}(T)]\}^\circ; \quad (2.20)$$

$$1 \cdot \Delta_C + 2 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{CO_2} = (-1) \cdot \{\ln(P_C) + \ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) - \ln[K_{CO_2}(T)]\}^\circ; \quad (2.21)$$

$$2 \cdot \Delta_H + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{H_2O} = (-1) \cdot \{2 \cdot \ln(P_H) + \ln(P_O) - \ln(P_{H_2O}) - \ln[K_{H_2O}(T)]\}^\circ; \quad (2.22)$$

$$1 \cdot \Delta_H + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{OH} = (-1) \cdot \{\ln(P_H) + \ln(P_O) - \ln(P_{OH}) - \ln[K_{OH}(T)]\}^\circ; \quad (2.23)$$

$$2 \cdot \Delta_H - 1 \cdot \Delta_{H_2} = (-1) \cdot \{2 \cdot \ln(P_H) - \ln(P_{H_2}) - \ln[K_{H_2}(T)]\}^\circ; \quad (2.24)$$

$$2 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{O_2} = (-1) \cdot \{2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{O_2}) - \ln[K_{O_2}(T)]\}^\circ; \quad (2.25)$$

$$2 \cdot \Delta_N - 1 \cdot \Delta_{N_2} = (-1) \cdot \{2 \cdot \ln(P_N) - \ln(P_{N_2}) - \ln[K_{N_2}(T)]\}^\circ; \quad (2.26)$$

$$1 \cdot \Delta_N + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{NO} = (-1) \cdot \{\ln(P_N) + \ln(P_O) - \ln(P_{NO}) - \ln[K_{NO}(T)]\}^\circ; \quad (2.27)$$

для [C]
$$\frac{P_{CO}}{A} \cdot \Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{A} \cdot \Delta_{CO_2} + \frac{P_C}{A} \cdot \Delta_C - 1 \cdot \Delta_{M_F} = (-1) \cdot [\ln(A) - \ln(M_F) - \ln(b_C)]^\circ, \quad (2.28)$$

де $A = P_{CO} + P_{CO_2} + P_C;$

для [H]
$$\frac{2 \cdot P_{H_2O}}{L} \cdot \Delta_{H_2O} + \frac{P_{OH}}{L} \cdot \Delta_{OH} + \frac{2 \cdot P_{H_2}}{L} \cdot \Delta_{H_2} + \frac{P_H}{L} \cdot \Delta_H - 1 \cdot \Delta_{M_F} = (-1) \cdot [\ln(L) - \ln(M_F) - \ln(b_H)]^\circ, \quad (2.29)$$

де $L = 2 \cdot P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{H_2} + P_H;$

для [O]

$$\frac{P_{CO}}{G} \cdot \Delta_{CO} + \frac{2 \cdot P_{CO_2}}{G} \cdot \Delta_{CO_2} + \frac{P_{H_2O}}{G} \cdot \Delta_{H_2O} + \frac{P_{OH}}{G} \cdot \Delta_{OH} + \frac{2 \cdot P_{O_2}}{G} \cdot \Delta_{O_2} + \frac{P_{NO}}{G} \cdot \Delta_{NO} + \frac{P_O}{G} \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{M_F} = (-1) \cdot [\ln(G) - \ln(M_F) - \ln(b_O + \alpha \cdot \chi_0^w \cdot 0,419)]^\circ, \quad (2.30)$$

де $G = P_{CO} + 2 \cdot P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{O_2} + P_{NO} + P_O;$

для [N]
$$\frac{2 \cdot P_{N_2}}{J} \cdot \Delta_{N_2} + \frac{P_{NO}}{J} \cdot \Delta_{NO} + \frac{P_N}{J} \cdot \Delta_N - 1 \cdot \Delta_{M_F} = (-1) \cdot [\ln(J) - \ln(M_F) - \ln(\alpha \cdot \chi_0^w \cdot 1,581)]^\circ, \quad (2.31)$$

де $J = 2 \cdot P_{N_2} + P_{NO} + P_N;$

для P_Σ
$$\frac{P_{CO}}{R} \cdot \Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{R} \cdot \Delta_{CO_2} + \frac{P_{H_2O}}{R} \cdot \Delta_{H_2O} + \frac{P_{OH}}{R} \cdot \Delta_{OH} + \frac{P_{H_2}}{R} \cdot \Delta_{H_2} + \frac{P_{O_2}}{R} \cdot \Delta_{O_2} + \frac{P_{N_2}}{R} \cdot \Delta_{N_2} + \frac{P_{NO}}{R} \cdot \Delta_{NO} + \frac{P_C}{R} \cdot \Delta_C + \frac{P_H}{R} \cdot \Delta_H + \frac{P_O}{R} \cdot \Delta_O + \frac{P_N}{R} \cdot \Delta_N = (-1) \cdot [\ln(R) - \ln(P_\Sigma)]^\circ, \quad (2.32)$$

де $R = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + P_{H_2} + P_{O_2} + P_{N_2} + P_{NO} + P_C + P_H + P_O + P_N$

Рішення будується з припущення про ізоентальпійність процесу. Для обраної пари ТПВ-окиснювач з відомими для них ентальпіями $I^{(MSW)}$ і $I^{(O)}$ заданою величиною χ^W (2.2) мольного коефіцієнта співвідношення компонентів обчислюється ентальпія палива:

$$I^{(F)} = I^{(MSW)} + \chi^W \cdot I^{(O)}. \quad (2.33)$$

2.1.3 Метод рішення моделі процесу термічної деструкції

Крок 1. Обирається деяка температура T^0 (початкове наближення). Вона вважається за реалізовану в розглянутий момент при згорянні $T_i = T^0$.

Крок 2. За допомогою ітераційного процесу на основі моделі, яку лінеаризують, (2.20 – 2.32), визначається склад (парціальні тиски P_i , а, отже, і молярні частки) продуктів згорання, відповідний до поточної розглянутої температури T_i . Як зазначалося раніше, необхідні для цього розрахунку значення констант хімічної рівноваги можуть бути взяті з таблиць або розраховані за допомогою апроксимаційних поліномів, подібних до наведених в [110].

Крок 3. Визначаються ентальпії продуктів згорання I_i , відповідні до поточної розглянутої температури T_i . Ці величини можуть бути також взяті з таблиць або розраховані за допомогою апроксимаційних поліномів, подібних до наведених в [110].

Крок 4. Використовуючи значення парціальних тисків як величини мольних часток відповідних газів, що входять до складу продуктів згорання, обчислюється їхня ентальпія I_{CP} :

$$I_{CP} = \sum(P_i \cdot I_i) \quad (2.34)$$

Крок 5. Порівнюються величини ентальпій палива й продуктів згорання при поточній температурі, що розглядається. Слід враховувати, що використані для розрахунку I_{CP} значення парціальних тисків чисельно

дорівнюють мольним концентраціям тільки в тому випадку, коли розглядається M_F молей палива. Іншими словами, порівняння ентальпій має відбуватися у вигляді співвідношення: $M_F \cdot I^{(F)} \leftrightarrow I_{CP}$

Крок 6. У разі рівності цих величин або допустимої величини відхилення температура і склад продуктів згоряння вважаються визначеними. Розрахунок зупиняється. В іншому випадку переходимо до наступного пункту.

Крок 7. Залежно від перевищення лівої чи правої частини виразу $M_F \cdot I^{(F)} \leftrightarrow I_{CP}$ відбувається коригування значення поточної температури T_i , що розглядається, у бік її збільшення або зменшення. З новим значенням величини T_i переходимо до кроку 2 і всі розрахунки повторюємо.

В основу розглянутого методу покладено припущення про ізоентальпійність процесу термічної деструкції. Такий стан спостерігається лише в окремих енергетичних установках. У переважній більшості енергетичних пристроїв умови ізоентальпійності процесу термічної деструкції не здійсненні. З цієї причини для досліджень розроблено спеціальний пристрій [61], який в подальшому буде використано для ідентифікації складу брутто-формули ТПВ.

2.1.4 Імітаційна модель ТПВ

Для імітаційного моделювання різних груп ТПВ, які утворюються після розділення загального об'єму, також можливо використати модель представлення суміші утворених сполук умовною формулою. У роботі [117] представлено результати класифікації ТПВ на чотири групи з різноманітних сполук, які входять до кожної групи. Усередненні сполуки в кожній групі дозволили отримати умовні формули кожної групи брутто-формули. Результати представлено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3.

Класифікований морфологічний склад ТПВ через представлення умовною формулою через усередненні сполуки[117]

№	Назва групи по [2]	Усереднена назва групи	Умовна формула усередненої сполуки
1	Вуглеводневі	A	$CH_{1,8}$
2	Вуглеводневі, які містять кисень	B	$CH_{1,7}O_{0,76}$
3	Вуглеводневі, які містять кисень та азот	C	$CH_2O_{0,51}N_{0,2}$
4	Вуглеводневі ті, що містять селективні активні елементи	D	$CH_{1,6}Cl_{0,5} F_2 S_{0,444}$

У відкритих інформаційних джерелах для умов України не було знайдено результатів систематизованих досліджень морфологічного складу ТПВ, які б мали залежність від умов їхнього виникнення. Єдиними джерелами статистичних даних були дослідження, які проводилися операторами ТПВ та відповідними асоціаціями в той чи інший час у тих чи інших регіонах. Їхні результати суттєво різняться між собою. Розбіжності в даних, скоріше за все, пов'язані з обмеженим обсягом вибірок. Обробка даних [117] дозволила отримати наступні результати за морфологічним складом ТПВ для України в 2018 році, а саме група А – 12%, В– 19%, С– 58%, D– 11%.

Загальний об'єм ТПВ утворюється шляхом природнього перемішування всіх видів ТПВ. Тому в пробі ТПВ, над якою проводиться аналіз дуже з високою вірогідністю будуть знаходитися різні групи, які було представлено у відношеннях в [117].

Для отримання класифікаційних ознак тієї чи іншої групи буде використано ізотермічне розкладання речовини [61]. При ізотермічному розкладанні визначено чотири групи, які складають загальний об'єм ТПВ,

можуть утворювати 11 варіантів різноманітних сумішей. Умовні формули таких сумішей наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4.

Склад окремих груп та сумішей ТПВ, що утворюються, та їхня умовна формула [9]

№ групи	Група суміші, яка може утворитись	Умовна формула усередненої суміші
1	A	$\text{CH}_{1,8}$
2	B	$\text{CH}_{1,7}\text{O}_{0,76}$
3	C	$\text{CH}_2\text{O}_{0,51}\text{N}_{0,2}$
4	D	$\text{CH}_{1,6}\text{Cl}_{0,5}\text{F}_2\text{S}_{0,444}$
5	A + B	$\text{CH}_{1,744}\text{O}_{0,427}$
6	A + C	$\text{CH}_{1,957}\text{O}_{0,4}\text{N}_{0,157}$
7	A + D	$\text{CH}_{1,737}\text{Cl}_{0,158}\text{F}_{0,633}\text{S}_{0,141}$
8	B + C	$\text{CH}_{1,922}\text{O}_{0,575}\text{N}_{0,148}$
9	B + D	$\text{CH}_{1,673}\text{Cl}_{0,133}\text{F}_{0,531}\text{S}_{0,118}$
10	C + D	$\text{CH}_{1,955}\text{O}_{0,453}\text{N}_{0,177}\text{Cl}_{0,056}\text{F}_{0,225}\text{S}_{0,05}$
11	A + B + C	$\text{CH}_{1,901}\text{O}_{0,478}\text{N}_{0,123}$
12	A + B + D	$\text{CH}_{1,955}\text{O}_{0,453}\text{N}_{0,177}\text{Cl}_{0,056}\text{F}_{0,225}\text{S}_{0,05}$
13	B + C + D	$\text{CH}_{1,72}\text{O}_{0,355}\text{N}_{0,001}\text{Cl}_{0,084}\text{F}_{0,337}\text{S}_{0,074}$
14	A + C + D	$\text{CH}_{1,925}\text{O}_{0,364}\text{N}_{0,143}\text{Cl}_{0,045}\text{F}_{0,181}\text{S}_{0,04}$
15	A + B + C + D	$\text{CH}_{1,88}\text{O}_{0,443}\text{N}_{0,114}\text{Cl}_{0,036}\text{F}_{0,145}\text{S}_{0,032}$

Таким чином таблиця 2.4 представляє собою табличну форму імітаційної моделі різних груп ТПВ, яка дозволить реалізувати спосіб класифікації при ідентифікації проб твердих побутових відходів. Такий спосіб ідентифікації дозволить виділяти групи, що утворюють кислі гази.

2.2 Метод сортування ТПВ для подальшої переробки з максимальною ефективністю

У загальному випадку об'єм ТПВ утворюється шляхом природнього перемішування всіх видів ТПВ, тому його розподіл на компоненти складається з наступних методів та алгоритмів. По-перше, з технологічного способу проведення сортування ТПВ. По-друге, методу сортування сировини-переробки, у який інтегровано вимірювальні пристрої для забезпечення заданих характеристик ідентифікації за класифікаційними ознаками. По-третє, принципу застосування вимірювальних пристроїв залежно від типу задачі ідентифікації за якісним або кількісним показниками, у якості яких були прийняті помилки першого та другого роду. Для ідентифікації кількісного показника помилка першого роду може належати інтервалу $0,7...0,9$, а помилка другого роду – $0,05...0,01$. Для ідентифікації якісного показника помилка першого роду може належати інтервалу $0,95...0,99$, а помилка другого роду – $0,001...0,005$.

2.2.1 Спосіб сортування ТПВ

Технологічний спосіб проведення сортування ТПВ складається з наступних кроків. Для розуміння способу не вказується, яка технологічна операція на якому виді обладнання проводиться.

Крок 1. Визначення маси дискретного обсягу ТПВ, що промислово переробляється. Визначення від поточного стану сировини мінімальної маси, з якої буде вилучена гетерогенна або гомогенна проба, яка залежить від прийнятого критерію аналізу, на підставі якої буде проведено якісну або кількісну ідентифікацію складу речовини. Граничною умовою мінімальної маси є її відношення до повної маси обсягу, що переробляється. Відношення має бути менше однієї проміле.

Крок 2. У поточній пробі визначають якісний або кількісний склад сировини шляхом її ідентифікації. Для якісного складу використовується ізоентальпійний спосіб визначення повного складу у пристрої [61] через

брутто-формулу. Для кількісного складу використовується спосіб експрес-гравіметрії одночасного визначення кількох елементів в одній пробі, що також дає можливість отримати брутто-формулу.

Крок 3. Не залежно від прийнятого способу визначення складу порівнюють отриману брутто-формулу з переліку брутто-формул імітаційної моделі див. табл. 2.3 з урахуванням похибок методів ідентифікації [119]. Відповідно до брутто-формули імітаційної моделі ідентифікують види класифікованих складових ТПВ і роблять висновок про наявність складу, який може утворювати кислі гази при його переробки методами термічної деструкції.

Крок 4. Привласнюємо значення одержаного складу мінімальній масі та відповідно до ідентифікованої брутто-формули направляємо на місце збору класифікованого виду сировини.

Крок 5. Визначаємо можливість проведення наступного циклу. Якщо є ще поточна мінімальна маса проводимо її аналіз та вимірювання. Якщо ні, весь обсяг ТПВ перероблений і здійснюється вихід з алгоритму.

2.2.2 Метод сортування ТПВ

Розглянемо метод сортування промислових обсягів сировини з метою їхньої подальшої переробки методами термічної деструкції. Метод складається з введеного найменування прийнятих змінних, правила складання констант й алгоритму сортування поточної порції сировини.

Прийняті змінні наступні:

A, B, C, D – позначення виділених I -х компонент морфологічного складу до аналізу (ознака - велика літера); позначення J -х компонентів після аналізу, які є домішками при аналізі тільки одного з виділених;

a, b, c, d – позначення виділених i -х компонент зі складу після аналізу (ознака-прописна літера); позначення j -х компонентів після аналізу, які залишилися не витягнутими за результатами вилучення одного з виділених;

M – загальна маса суміші до аналізу;

M_I – маса першої компоненти суміші до аналізу;

m_i – маса i -ої компоненти суміші після аналізу самої компоненти;

R_I – відсотковий вміст I -ої компоненти в загальній масі суміші до аналізу;

R_i – відсотковий вміст залишеної i -ої компоненти для аналізу після вилучення I -ої компоненти із загальної маси;

P_I – параметр ідентифікації I -ої компоненти суміші до аналізу;

i_{ost} – залишок i -ої компоненти суміші після аналізу;

j_{ost} – залишок j -ої компоненти суміші після аналізу.

Введемо правила складання змінних для методу сортування промислових обсягів сировини.

$k(i_{ost})$ – коефіцієнт для визначення частки домішок в залишку i -ї компоненти після аналізу ;

$m i_{ost}$ – маса залишку i -ї компоненти після аналізу;

$R(i_{ost}(J))$ – відсотковий вміст компоненти J у залишку компоненти i ;

$m(i_{ost}(J))$ – маса домішки компоненти J у залишку компоненти i ;

$m(i_{ost}(j))$ – маса домішки компоненти j у залишку компоненти i ;

$m(i_{ost}(j_{ost}))$ – маса залишку домішки компоненти j у залишку компоненти i ;

$m(i_{ost}j_1j_2j_3)$ – маса суміші, що залишилася після виділення з неї I -ої (одної) компоненти для подальшого аналізу, яка надходить на вилучення наступної компоненти в поточному циклі;

$m(i_{1ost}i_{2ost}j_1j_2)$ – аналогічно попередньому, тільки після виділення з неї I -ої (двох) компонент;

$m(i_{1ost}i_{2ost}i_{3ost}j_1)$ – аналогічно попередньому, тільки після виділення з неї I -ої (трьох) компонент;

$m(i_{1ost}i_{2ost}i_{3ost}i_{4ost})$ – аналогічно попередньому, тільки після виділення з неї I -ї (чотирьох) компонент;

Покажемо правила складання констант:

MA, MB, MC, MD – маса, відповідно, компонент A, B, C, D до аналізу;

RA, RB, RC, RD – процентний зміст, відповідно, компонент A, B, C, D до аналізу;

PA, PB, PC, PD – параметр ідентифікації (якісний або кількісний) відповідних компонентів A, B, C, D для аналізу;

Покажемо правила складання констант з прикладу компоненти A :

MA_{start} – масова концентрація A до аналізу;

$k(a_{ost})$ – коефіцієнт для визначення процентного вмісту домішок B, C, D в залишку компоненти a після аналізу;

$R(a_{ost}(B)), R(a_{ost}(C)), R(a_{ost}(D))$ – відсотковий зміст, відповідно, компоненти B, C, D у залишку компоненти a після аналізу;

ma_{ost} – маса залишку компоненти a після аналізу;

$m(a_{ost}(B)), m(a_{ost}(C)), m(a_{ost}(D))$ – маса домішки, відповідно, компоненти B, C, D у залишку компоненти a після аналізу;

mb, mc, md – маса, відповідно, компонентів b, c, d без частки, що залишилася у вигляді домішки у залишку a ;

$m(a_{ost}bcd)$ – маса суміші, що залишилася після виділення компоненти A , в суміші залишилися компоненти a_{ost}, b, c, d , які надходять на наступний крок для подальшого виділення нової компоненти;

Алгоритм сортування поточної порції сировини.

Крок 1. Розрахунок маси компоненти A та виявлення в ній домішок B, C, D .

Дія 1.1. Розрахунок маси MA компоненти A до аналізу :

$$MA = M * DA.$$

Дія 1.2. Розрахунок масової концентрації MA_{start} компоненти до аналізу:

$$MA_{start} = MA * PA.$$

Дія 1.3. Розрахунок маси залишку ma_{ost} компоненти А після аналізу :

$$ma_{ost} = M - MA_{start}.$$

Дія 1.4. Розрахунок процентного змісту кожного компоненту домішки j , що надійшов на обробку: на Кроку 1 це вихідні параметри RB, RC, RD .

Дія 1.5. Розрахунок маси домішок B, C, D у залишку a .

Розрахунок коефіцієнта $k(a_{ost})$ визначення процентного вмісту домішок B, C, D у залишку компоненти a :

$$k(a_{ost}) = \frac{1}{RB + RC + RD}$$

Розрахунок частки домішок B, C, D у залишку компоненти a :

$$R(a_{ost}(B)) = RB * k(a_{ost}), R(a_{ost}(C)) = RC * k(a_{ost}), R(a_{ost}(D)) = RD * k(a_{ost})$$

Розрахунок маси домішок B, C, D у залишку a :

$$\begin{aligned} m(a_{ost}(B)) &= ma_{ost} * R(a_{ost}(B)), m(a_{ost}(C)) \\ &= ma_{ost} * R(a_{ost}(C)), m(a_{ost}(D)) = ma_{ost} * R(a_{ost}(D)) \end{aligned}$$

Дія 1.6. Перевірка матеріального балансу Крок 1:

$$MA = MA_{start} + m(a_{ost}(B)) + m(a_{ost}(C)) + m(a_{ost}(D))$$

Дія 1.7. Розрахунок маси компонентів b, c, d без частки, що залишилася у вигляді домішки в залишку a :

$$mb = MB - m(a_{ost}(B)); \quad mc = MC - m(a_{ost}(C)); \quad md = MD - m(a_{ost}(D)),$$

Дія 1.8. Визначення маси суміші, що передається на Крок 2:

$$m(a_{ost}bcd) = ma_{ost} + mb + mc + md.$$

Крок 2. Відділення від загальної маси компоненти В та виявлення в ній домішок a, c, d .

Дія 2.1. Розрахунок масової концентрації mb_{start} компоненти b :

$$mb_{start} = mb * PB.$$

Дія 2.2. Розрахунок маси залишку mb_{ost} компоненти b після аналізу :
 $mb_{ost} = mb - mb_{start}$.

Дія 2.3. Розрахунок процентного змісту кожного компонента, a_{ost}, c, d що надійшов на обробку:

$$Ra_{ost} = ma_{ost}/m(a_{ost}bcd),$$

$$Rc = mc/ m(a_{ost}bcd), Rd = md/ m(a_{ost}bcd).$$

Дія 2.4. Розрахунок маси домішок a, c, d у залишку b .

Розрахунок коефіцієнта $k(b_{ost})$ визначення процентного вмісту домішок a, c, d у залишку компоненти b :

$$k(b_{ost}) = \frac{1}{Ra_{ost} + Rc + Rd}$$

Розрахунок частки домішок a, c, d у залишку компоненти b :

$$R(b_{ost}(a_{ost})) = Ra_{ost} * k(b_{ost}), R(b_{ost}(c)) = Rc * k(b_{ost}), R(b_{ost}(d)) \\ = Rd * k(b_{ost})$$

Розрахунок маси домішок a, c, d у залишку b :

$$m(b_{ost}(a_{ost})) = mb_{ost} * R(b_{ost}(a_{ost})), m(b_{ost}(c)) \\ = mb_{ost} * R(b_{ost}(c)), m(b_{ost}(d)) = mb_{ost} * R(b_{ost}(d))$$

Дія 2.5. Перевірка матеріального балансу Крок 2:

$$mb = mb_{start} + m(b_{ost}(a_{ost})) + m(b_{ost}(c)) + m(b_{ost}(d))$$

Дія 2.6. Розрахунок маси a, c, d без частки, що залишилася у вигляді домішки у залишку b :

$$ma_{ost} = ma_{ost} - m(b_{ost}(a_{ost})), mc = mc - m(b_{ost}(c)), md \\ = md - m(b_{ost}(d))$$

Дія 2.7. Визначення маси суміші, що передається на Крок 3:

$$m(a_{ost}b_{ost}cd) = ma_{ost} + mb_{ost} + mc + md$$

Крок 3. Відділення від загальної маси компоненти C та виявлення в ній домішок a, b, d .

Дія 3.1. Розрахунок масової концентрації mc_{start} компоненти c :

$$m_{c_{start}} = mc * PC.$$

Дія 3.2. Розрахунок маси залишку $m_{c_{ost}}$ компоненти після аналізу :

$$m_{c_{ost}} = mc - m_{c_{start}}$$

Дія 3.3. Розрахунок процентного змісту кожного компонента, a_{ost}, b_{ost}, d що надійшов на обробку:

$$Ra_{ost} = ma_{ost}/m(a_{ost}b_{ost}cd), Rb_{ost} = mb_{ost}/m(a_{ost}b_{ost}cd), Rd = md/m(a_{ost}b_{ost}cd).$$

Дія 3.4. Розрахунок маси домішок a, b, d у залишку c .

Розрахунок коефіцієнта $k(c_{ost})$ визначення процентного вмісту домішок a, b, d у залишку компоненти c :

$$k(c_{ost}) = \frac{1}{Ra_{ost} + Rb_{ost} + Rd}$$

Розрахунок частки домішок a, b, d у залишку компоненти c :

$$R(c_{ost}(a_{ost})) = Ra_{ost} * k(c_{ost}), R(c_{ost}(b_{ost})) = Rb_{ost} * k(c_{ost}), R(c_{ost}(d)) = Rd * k(c_{ost}).$$

Розрахунок маси домішок a, b, d у залишку c :

$$m(c_{ost}(a_{ost})) = mc_{ost} * R(c_{ost}(a_{ost})), m(c_{ost}(b_{ost})) = mc_{ost} * R(c_{ost}(b_{ost})), m(c_{ost}(d)) = mc_{ost} * R(c_{ost}(d)).$$

Дія 3.5. Перевірка матеріального балансу Крок 3:

$$mc = m_{c_{start}} + m(c_{ost}(a_{ost})) + m(c_{ost}(b_{ost})) + m(c_{ost}(d)).$$

Дія 3.6. Розрахунок маси a, b, d без частки, що залишилася у вигляді домішки у залишку c :

$$ma_{ost} = ma_{ost} - m(c_{ost}(a_{ost})), mb_{ost} = mb_{ost} - m(c_{ost}(b_{ost})), md = md - m(c_{ost}(d)).$$

Дія 3.7. Визначення маси суміші, що передається на Крок 4:

$$m(a_{ost}b_{ost}c_{ost}d) = ma_{ost} + mb_{ost} + mc_{ost} + md.$$

Крок 4. Відділення від загальної маси компоненти D та виявлення в ній домішок a, b, c .

Дія 4.1. Розрахунок масової концентрації md_{start} компоненти d :

$$md_{start} = md * PD.$$

Дія 4.2. Розрахунок маси залишку md_{ost} компоненти d після аналізу :

$$md_{ost} = md - md_{start}$$

Дія 4.3. Розрахунок процентного змісту кожного компонента, $a_{ost}, b_{ost}, c_{ost}$, що надійшов на обробку:

$$Ra_{ost} = ma_{ost}/m(a_{ost}b_{ost}c_{ost}d), \quad Rb_{ost} = mb_{ost}/m(a_{ost}b_{ost}c_{ost}d), \\ Rc_{ost} = mc_{ost}/m(a_{ost}b_{ost}c_{ost}d).$$

Дія 4.4. Розрахунок маси домішок a, b, c у залишку d .

Розрахунок коефіцієнта $k(d_{ost})$ визначення процентного вмісту домішок a, b, c у залишку компоненти b :

$$k(d_{ost}) = \frac{1}{Ra_{ost} + Rb_{ost} + Rc_{ost}}$$

Розрахунок частки домішок a, b, c у залишку компоненти d :

$$R(d_{ost}(a_{ost})) = Ra_{ost} * k(d_{ost}),$$

$$R(d_{ost}(b_{ost})) = Rb_{ost} * k(d_{ost}),$$

$$R(d_{ost}(c_{ost})) = Rc_{ost} * k(d_{ost}).$$

Розрахунок маси домішок a, b, c у залишку d :

$$m(d_{ost}(a_{ost})) = md_{ost} * R(d_{ost}(a_{ost})),$$

$$m(d_{ost}(b_{ost})) = md_{ost} * R(d_{ost}(b_{ost})),$$

$$m(d_{ost}(c_{ost})) = md_{ost} * R(d_{ost}(c_{ost})).$$

Дія 4.5. Перевірка матеріального балансу Крок 4:

$$md = md_{start} + m(d_{ost}(a_{ost})) + m(d_{ost}(b_{ost})) + m(d_{ost}(c_{ost})).$$

Дія 4.6. Розрахунок маси a, b, c без частки, що залишилася у вигляді домішки у залишку d :

$$ma_{ost} = ma_{ost} - m(d_{ost}(a_{ost})), \quad mb_{ost} = mb_{ost} - m(d_{ost}(b_{ost})),$$

$$mc_{ost} = mc_{ost} - m(d_{ost}(c_{ost})).$$

Дія 4.7. Визначення маси суміші, що передається на Крок 3:

$$m(a_{ost}b_{ost}c_{ost}d_{ost}) = ma_{ost} + mb_{ost} + mc_{ost} + md_{ost}.$$

Крок 5. Визначення можливості проведення наступного циклу. Якщо є ще поточна аналізована порція проводимо її аналіз та вимірювання. Якщо ні, весь обсяг ТПВ перероблено й виходимо з алгоритму. Слід зауважити, що в разі технологічної організації виявлення та відокремлення різних складових на кожному етапі поточна помилка матеріального балансу враховується в технологічному залишку.

2.2.3 Результати моделювання складу ТПВ

Відповідно до представленого методу сортування ТПВ та імітаційної моделі у вигляді бруто-формули було проведено моделювання одного складу ТПВ згідно [117]: А - 12%, В - 19 %, С - 58 %, D - 11 % двома методами, що розглядаються. Було отримано результат, що ідентифікація ізоентальпійним методом не враховує склад, якщо елемент, що розглядається менше ніж 5% по масі від всієї проби, а метод ідентифікації експрес-гравіметричним способом враховує таке. Для підтвердження такої думки було проведено моделювання такого складу де три з чотирьох компонент мали масу менше ніж 5 %. Результати моделювання зведені у таблиці 2.5. Другий склад відповідав гранично допустимому (гіпотетичному) значенню однієї компоненти й однаковим значенням трьох інших: А - 85%, В - 5%, С - 5%, D - 5%. Результати моделювання зведені у таблиці 2.6.

Аналіз результатів моделювання сортування сировини із заданими характеристиками через ідентифікацію й класифікацію дозволяє встановити послідовність проведення сортування промислових об'ємів ТПВ.

Перше якісне сортування проводять на основі ідентифікації ізоентальпійним способом, що дає можливість на другому етапі провести сортування кількісним методом на основі експрес-гравіметричного способу. Якісний спосіб дозволяє, в першу чергу, відсортувати сировину, яка з високою вірогідністю складеться на 80...85 % з одного типу вихідної суміші, що суттєво скорочує об'єми сортування. Сліди сполук, що можуть утворювати кислі гази менш ніж 0,1% за масою, що дозволяють досить ефективно їх

знешкоджувати спеціальними технологіями очистки при прямому спалюванні в промислових котлах. Якщо в результаті кількісного методу виявляються групи сполук, що також можуть утворювати кислі гази, така сировина може перероблятися у технології піролізу. У такій технології кислі гази, які потрапляють до синтез-газу зв'язуються на лужних фільтрах. Але більша частина сполук, зв'язаному виді залишається в так званому вуглистому залишку.

Таблиця 2.5.

Результати моделювання складу ТПВ за [9, 117]

Склад ТПВ та розрахована бруто-формула		
Вихідна суміш	Після сортування суміші при ідентифікації експрес-гравіметричним способом	Після сортування суміші при ідентифікації ізоентальпійним способом
A= 120	A=108; b=2,6; c=7,9; d=1,5	A=109; b=0; c=7,9; d=0
B= 190	$\text{CH}_{1,799}\text{O}_{0,034}\text{N}_{0,005}\text{Cl}_{0,009}\text{F}_{0,035}\text{S}_{0,008}$	$\text{CH}_{1,81}\text{O}_{0,026}$
C= 580	B=169; a=0,3; c=15,5; d=2,9	B=171; a= 0; c=15,5; d=0
D= 110	$\text{CH}_{1,712}\text{O}_{0,687}\text{N}_{0,003}\text{Cl}_{0,006}\text{F}_{0,023}\text{S}_{0,005}$	$\text{CH}_{1,723}\text{O}_{0,741}\text{N}_{0,016}$
	C=501; a=4,7; b=7,7; d=43,2	C=505; a=4,7; b=7,7; d=43,2
	$\text{CH}_{1,974}\text{O}_{0,453}\text{N}_{0,177}\text{Cl}_{0,006}\text{F}_{0,025}\text{S}_{0,005}$	$\text{CH}_{1,972}\text{O}_{0,481}\text{N}_{0,184}\text{Cl}_{0,026}\text{F}_{0,105}\text{S}_{0,023}$
	D=56,1; a=0,6; b=0,9; c=4,7	D=103,8; a=0; b=0; c=0
	$\text{CH}_{1,636}\text{O}_{0,004}\text{N}_{0,001}\text{Cl}_{0,0410}\text{F}_{1,641}\text{S}_{0,364}$	$\text{CH}_{1,6}\text{Cl}_{0,5}\text{F}_2\text{S}_{0,444}$
	a=6,3; b=10,1; c=50,9; d=6,2	a=6,3 ;b=10,1; c=50,9; d=6,2
	$\text{CH}_{1,799}\text{O}_{0,024}\text{N}_{0,004}\text{Cl}_{0,006}\text{F}_{0,025}\text{S}_{0,006}$	$\text{CH}_{1,911}\text{O}_{0,461}\text{N}_{0,137}\text{Cl}_{0,028}\text{F}_{0,112}\text{S}_{0,025}$

Таблиця 2.6.

Результати моделювання складу ТПВ для підтвердження отриманого висновку [9, 117]

Склад ТПВ та розрахована бруто-формула		
Вихідна суміш	Після сортування суміші при ідентифікації експрес-гравіметричним способом	Після сортування суміші при ідентифікації ізоентальпійним способом
A = 850	A=765; b=28,3; c=28,3; d=28,3	A=850; b=0; c=0; d=0
B = 50	$\text{CH}_{1,88}\text{O}_{0,443}\text{N}_{0,114}\text{Cl}_{0,036}\text{F}_{0,145}\text{S}_{0,032}$	$\text{CH}_{1,8}$
C = 50	B=19,5; a=1,4; c=0,4; d=0,4	B=50; a=0; c=0; d=0
D = 50	$\text{CH}_{1,88}\text{O}_{0,443}\text{N}_{0,114}\text{Cl}_{0,036}\text{F}_{0,145}\text{S}_{0,032}$	$\text{CH}_{1,7}\text{O}_{0,760}$
	C=19,2; a=1,66; b=0,04; d=0,4	C=50; a=0; b=0; d=0
	$\text{CH}_{1,88}\text{O}_{0,443}\text{N}_{0,114}\text{Cl}_{0,036}\text{F}_{0,145}\text{S}_{0,032}$	$\text{CH}_2\text{O}_{0,51}\text{N}_{0,2}$
	D=18,8; a=2; b=0,05; c=0,05	D=50; a=0; b=0; c=0
	$\text{CH}_{1,88}\text{O}_{0,443}\text{N}_{0,114}\text{Cl}_{0,036}\text{F}_{0,145}\text{S}_{0,032}$	$\text{CH}_{1,6}\text{Cl}_{0,5}\text{F}_2\text{S}_{0,444}$
	a =79,9; b=2,05; c=2,05; d=2,1	a =0; b=0; c=0; d=0
	$\text{CH}_{1,88}\text{O}_{0,443}\text{N}_{0,114}\text{Cl}_{0,036}\text{F}_{0,145}\text{S}_{0,032}$	

Результати, отримані при моделюванні, підтвердили принципову можливість поділу промислового обсягу ТПВ на п'ять можливих незалежних складових з різним морфологічним складом. Ланцюг аналізів, утворених якісним і кількісним методами ідентифікувати ТПВ дозволяє з точністю не більше 1% знайти бруто-формулу кожної складової морфологічного складу ТПВ.

2.3 Імітаційна модель процесу очищення вуглецево-водневих газів

На даний момент керування процесами термічної деструкції ТПВ та утворенням ПЗ є головним етапом при стабілізації екологічної складової для забезпечення показників в процесах організаційно-технічних систем та

комплексів для підвищення ефективності, продуктивності, надійності, ритмічності та конкурентоспроможності. Мінімізація обсягів ТПВ за допомогою процесів термічної деструкції на сміттєпереробних установках набула широкого розвитку у світовій практиці в індустріально розвинених державах. Такі країни як Данія, Швейцарія та Японія термічно переробляють близько 70% своїх ТПВ; Німеччина, Нідерланди та Франція - близько 40%.

Процеси термічної деструкції дозволяють у 3 рази зменшити масу відходів, усунути деякі їхні властивості: запах, виділення токсичних рідин, розмноження бактерій, а також виробити додаткову енергію, яку можна використовувати для електрики або опалення.

Важливим етапом екологічної стабілізації є скорочення газоподібних викидів під час проведення процесів термічної деструкції ТПВ. Розроблені в останнє десятиліття технологічні способи підготовки ТПВ до термічної переробки та подальшої їхньої мінімізації термічними методами дозволяють керувати залишковим негативним впливом на навколишнє середовище при спалюванні одержуваних вуглеводневих газів з супутніми кислими газами.

У розділі 2.1, літературних джерелах [9],[114],[117] для різних груп ТПВ, що утворюються з метою імітаційного моделювання, запропонована можливість використовувати подання суміші сполук, що утворилися, умовною формулою. Крім того, пропонується класифікувати ТПВ з різних сполук, що входять до кожної групи. На основі запропонованого у розділі 2.2 методу сортування [9] ,[11] отримано результат у вигляді умовних бруто-формул кожної групи морфологічного складу, який свідчить, що неможливо отримати очищені розділені суміші. У будь-яких сумішах є домішки сполук ТПВ класу D, що означає присутність елементів, що утворюють кислі гази. Такий стан речей унеможливорює пряме спалювання розділених сполук класів А, В, С, оскільки в продуктах термічної деструкції утворюватимуться кислі гази, і можливе їхнє перевищення, що регламентується неприпустимими екологічними нормами. Тому додатково з'являються витрати на очищення продуктів термічної деструкції від кислих газів.

2.3.1 Урахування компонентів, що утворюють кислотні газоутворюючі елементи в моделі процесу термічної деструкції.

При переробці ТПВ методами термічної деструкції розрахунок нижчою теплотою згоряння, розраховується за моделлю, яку наведено у розділі 2.1.2.

Для визначення кількості кислого газу система рівнянь (2.1-2.13) повинна містити компоненти з кислотними газоутворюючими елементами. Однак вирішення цієї системи призвело до нестабільності та значних помилок. Метод Ньютона був розглянутий, але в результаті отримав погано обумовлену лінеаризовану систему. Як альтернатива, оцінка парціальних тисків на основі співвідношення молярних мас елементів, що утворюють кислотні сполуки, забезпечила більш стабільний підхід:

$$P_{HCl} = P_{\Sigma} \{M(Cl_{m1})/M(CH_n O_m N_k Cl_{m1} F_{m2} S_{m3})\},$$

$$P_{HF} = P_{\Sigma} \{M(F_{m2})/M(CH_n O_m N_k Cl_{m1} F_{m2} S_{m3})\},$$

$$P_{SO_2} = P_{\Sigma} \{M(S_{m3})/M(CH_n O_m N_k Cl_{m1} F_{m2} S_{m3})\},$$

де: $n, m, k, m1, m2, m3$ - відповідна кількість атомів речовини у ТПВ при сортуванні за морфологічною ознакою одного виду, див. табл. 2.5.

Кількість атомів в ТПВ, які утворюють кислі гази, розрахуємо на підставі урахування кількості розглянутих його молекул M_F та парціального тиску,

$$\text{для } [Cl] \quad b_{Cl} \cdot M_F = P_{HCl};$$

$$\text{для } [F] \quad b_F \cdot M_F = P_{HF};$$

$$\text{для } [S] \quad b_S \cdot M_F = P_{SO_2}.$$

2.3.2 Оцінка ефективності термічної деструкції ТПВ

В [120] запропоновано формулу для оцінки ефективності E установок, в яких відбувається процес термічної деструкції ТПВ з метою вироблення теплової або електричної енергії для відпустки споживачеві.

$$E = (E_p - (E_f + E_i))/(0,97 \cdot (E_w + E_i)), \quad (2.35)$$

де E_p - енергія, відпущена споживачеві у вигляді тепла або електроенергії, ГДж/рік. Ця величина ділиться на ефективність перетворення 0,91 під час виробництва тепла або на 0,38 під час виробництва електрики; E_f - теплота додаткового палива, витраченого на виробництво енергії, ГДж/рік; E_w - теплота згоряння відходів, які переробляють, ГДж/рік; E_i - енергії, що отримується від зовнішнього джерела, ГДж/рік, 0,97 - показник для розрахунку теплових втрат для золошлаків і з димовими газами.

У [120] відзначається, що E не характеризує термодинамічну ефективність, тому через ефективність перетворення при відпустці електроенергії та тепла ця величина в ряді випадків може бути більше 1. Вираз (2.35) дає можливість визначити напрямок діяльності підприємства або на термічну переробку ТПВ з метою виробництва енергетичної продукції, або просто на термічну утилізацію відходів (зменшення об'єму ТПВ). Процес термічної переробки ТПВ вважається утилізацією, коли показник процесу становить 0,55 і менше.

Вираз (2.35) було дещо модернізовано для визначення ефективності термічної деструкції різних груп сортованих ТБО наступним чином:

$$\varepsilon = E_p / (0,97 \cdot (E_f + E_{ii} + E_w + E_{ch})),$$

де E_p - енергія, відпущена споживачеві у вигляді тепла або електроенергії. Аналіз проводився щодо прив'язки до часу на 1 годину для виробництва 1 ГДж теплової енергії. Для дотримання розмірності враховувалася витрата ТБО різних груп у масовій витраті m , кг/год.. E_w - теплота згоряння відходів, які переробляють, розраховувалося за виразом $E_w = \sum [P_i \cdot (I_{CP} - I_{298})_i]$. Витрати енергоресурсів для видалення пилу та золовидалення в установках для оцінки E_f . Витрати на електроенергію для роботи систем очищення, E_{ii} . E_{ch} - додаткова енергія, витрачена на виробництво всіх хімічних реагентів, потрібних для очистки димових газів, до стану, який відповідає гранично допустимим концентраціям, ГДж/час.

Технологічний норматив допустимих викидів у разі термічної деструкції в печах необроблених ТПВ встановлюється через допустимий викид (відповідно до додатка V Директиви ЕС/2000/76), який вимірюється в масових концентраціях для хлористого водню (HCl) 30 мг/м³ і фтористого водню (HF) 5 мг/м³, та для діоксиду сірки (SO₂) на рівні 1800 мг/м³, якщо димові гази нормуються до температури 0°C (273,15 К) та тиску 101,32 кПа (без поправок на вміст води чи кисню) [120].

Після обробки додаткових літературних джерел і проведених попередніх розрахунків були отримані результати, які наведено в таблиці 2.7, для оцінки ε при спалюванні в установках невологих ТПВ при дотриманні екологічних показників.

Таблиця 2.7.

Показники ефективності термічної деструкції різних груп ТПВ, які отримано при сортуванні [12].

	Вуглеводневі ТПВ, що містять:			
	CH _n	кисень, CH _n O _m	кисень та азот, CH _n O _m N _k	активні елементи: CH _n F _{m2} , CH _n Cl _{m1} , CH _n S _{m3}
E_w МДж/кг	45	18	30	35
m , кг/час	22	56	33	26
E_{ii} , ГДж/час	0,099	0,11	0,13	0,22
E_f , ГДж/час	-	0,053	0,078	0,109
E_{ch} , ГДж/час	-	-	0,098	0,31
ε	0,91	0,86	0,77	0,61

Показник ефективності (ε) термічної деструкції відсортованих ТПВ методами термічного розкладання, а саме повного згоряння в повітряній

атмосфері, є вирішальним фактором при визначенні правила прийняття рішення щодо вибору відповідного технічного засобу переробки. Використання критерію ε допомагає встановити межу між двома методами термічної деструкції: спалюванням у повітряній атмосфері та піролізом для синтезу газу. Ідеальні умови дозволяють спалювати класифіковані групи відходів (А, В, С) у повітрі, з коефіцієнтами надлишку повітря для кожної групи, дотримуючись норм викидів. Однак класифікована група відходів (D), що містить речовини, що утворюють кислі гази, потребує піролізу зі спеціальною технологією очищення [117].

2.3.3 Оцінка питомих витрат термічної деструкції ТПВ

Для визначення ефективності термічної деструкції різних груп, сортованих ТПВ, крім ε , можливе використання виразу для оцінки питомих витрат для переробки 1 кг ТПВ, у якому наявні елементи, що утворюють кислі гази, залежно від концентрації i -го поточного сортованого виду $Pr(\text{ТПВ})^i$, з кореляцією до поточної питомої ціни природного газу $Pr(\text{CH}_4)$, але за 1 кг.

$$Pr(\text{ТПВ})^i = (1 - \varepsilon_i) \cdot Pr(\text{CH}_4) \cdot C_{start}^i \cdot e^{((C_{lim}^i - C_{adj}^{j\text{ cyc}}) / (C_{lim}^i - C_{start}^i))}$$

де: ε_i – коефіцієнт ефективності термічної деструкції i -ої групи ТПВ;
 C_{start}^i – масова концентрація i -го ТБО потрапляє на перший цикл переробки;
 C_{lim}^i – гранично можлива масова концентрація i -го ТПВ, що забезпечується результатом сортування; $C_{adj}^{j\text{ cyc}}$ – проміжна масова концентрація i -го ТПВ для j -го циклу підвищення масової концентрації групи після сортування групи, що розглядається.

2.4 Правило прийняття рішення для формування структури технічних засобів при переробці ТПВ

Для формулювання правил прийняття рішення щодо вибору способу переробки ТПВ з дотриманням екологічних показників та визначення відповідної структури технічних засобів розроблено метод розрахунку витрат,

що враховує оцінку показника ефективності та оцінку питомих витрат термічної деструкції різних груп відсортованих ТПВ.

2.4.1 Модель витрат на мінімізацію впливу речовин, що утворюють кислі гази для різних компонентів ТПВ

Основна ідея методу полягає у моделюванні витрат на термічну деструкцію заданого складу ТПВ масою 1 кг, який містить відому кількість елементів, що утворюють кислі гази, методом піролізу та методом прямого спалювання. Для коректної сумісності результатів енергетичний ефект наводиться до однакового значення з урахуванням зростання або зменшення витрат на утилізацію кислих газів. Потім здійснюється перерахунок питомого показника вартості одиниці енергетичної продукції за однакового граничного забезпечення екологічних викидів. Найменший показник з розглянутих методів термічної деструкції з урахуванням похибок моделей буде критерієм вибору правила прийняття рішення. Рівнозначність показників у рамках смуги похибок, що розглядається, говорить про рівноцінність обох методів.

Розглянемо витрати на мінімізацію впливу речовин, що утворюють кислі гази в компонентах (методом піролізу для отримання синтез-газу та методом спалювання в котлі для вироблення теплової енергії). Витрати очищення розраховуються на 1 кг оброблюваної компоненти ТПВ.

Масова концентрація речовини, що утворюють кислі гази (кг/кг):

$$C_{\text{acid}} = m_{\text{acid}}/m_{\text{comp}} ,$$

де m_{comp} – 1 кг поточної компоненти після сортування,

m_{acid} – маса речовин у поточній компоненті, які утворюють кислі гази (кг).

Гранична маса речовин, що утворює кислі гази не перевищує 0,24 кг в 1 кг будь-якої компоненти. Дані одержані з обробки табл. 2.6.

C_{acid}^{lim} – максимально допустима концентрація речовин у поточній компоненті, що утворюють кислі гази при її термічній переробці, згідно з граничними регламентними екологічними вимогами.

$\Delta C_{max} = C_{acid} - C_{acid}^{lim}$ — зміна концентрації, яка має бути здійснена шляхом введення додаткової маси нейтралізуючої речовини в процесі термічної переробки

Маса нейтралізуючої речовини $m_{neutr} = 2 \cdot m_{acid}$ визначається з урахуванням молярних мас і кінетичних коефіцієнтів, що враховують неповноту реакцій нейтралізації, що протікають.

Визначимо максимальні витрати на нейтралізацію кислої компоненти в інтервалі зміни концентрацій від C_{acid} до C_{acid}^{lim} . Для нейтралізації кислих компонентів у термічних технологіях утилізації використовують СаО (негашене вапно). Визначимо сумісні умовні грошові одиниці (УмГрОд) за 1 кг СаО та 1 кг метанового газу.

Теплотворна здатність метанового газу 55,3(МДж/кг) і його вартість 1 кг 0,6 УмГрОд/кг. Вартість 1 кг СаО становить $Cost^{max} = 0,25$ УмГрОд /кг. Це відношення між витратами на газ і на СаО потрібно приблизно дотримуватися, оскільки виробництво СаО вимагає пропорційного споживання метанового газу. Вихід із представлених даних, з урахуванням технологічності застосування, передбачає максимальні витрати для різних компонентів: $Cost_{comp}^{max} = var_{comp}^i \cdot Cost^{max}$. Показники носять емпіричний характер і були отримані обробкою даних:

$$var_{comp}^A = 0,29; var_{comp}^B = 0,35;$$

$$var_{comp}^C = 0,67; var_{comp}^D = 1.$$

Припустимо, у результаті термічної переробки, з певних причин, не може бути досягнута C_{acid}^{lim} — допустима концентрація речовин. У цьому випадку витрати для отримання проміжного значення концентрації C_{acid}^i

(наприклад, $C_{acid}^A=0,025$ (кг/кг) при переробці 1кг компоненти А) визначаються наступним чином:

$$Cost_{comp}^i(C_{acid}; C_{acid}^i) = Cost_{comp}^{max} \cdot C_{acid}^i / \Delta C_{max} \cdot e^{\frac{\Delta C_{max} - C_{acid}^i}{\Delta C_{max}}}$$

У результаті всіх обмежень і припущень, які були прийняті, вираз може бути використаний для речовин, що утворюють кислі гази, зі значенням величини концентрації від максимально допустимої до мінімальної величини, що становить 0,5% за масою компоненти, що розглядається.

2.4.2 Модель витрат очищення синтез-газу та димових газів

Розглянемо такі положення, що визначають витрати на видалення із синтез-газу кислих газів для доведення їхньої концентрації до екологічно безпечної норми. Також витрати на очищення димових газів, що надходять із котла в навколишнє природне середовище.

Завдання вирішується для очищення 1 кг синтез-газу або димового газу. Внаслідок аналізу літературних даних прийнято проводити очищення через сухий рукавний фільтр. Матеріал фільтра – нітрон. Вартість рукава 1900 УмГрОд/т, а адсорбуюча речовина, як і раніше, СаО. Завдання вирішується у масових концентраціях. Тепер розрахунок вартості очищення одного кілограма синтез-газу або димового газу здійснюється від залишкової концентрації речовин, що утворюють кислі гази, залишкова кількість яких становить 75% від початкової величини (це значення визначено на основі аналізу літератури з очищення піролізних газів), т.к. 25% речовин, що утворюють кислі гази, залишається у шламi.

Гранично максимальне значення C_{gas}^i не може перевищувати значення 0,18 кг/кг.

$\Delta C_{max} = C_{gas}^i - C_{gas}^{lim}$ – зміна концентрації, яка має бути здійснена шляхом введення додаткової маси нейтралізуючої речовини в рукавний фільтр.

Концентрація газів доводиться до граничної норми, що забезпечує екологічну безпеку C_{gas}^{lim} .

У рукавному фільтрі на очищення одного кілограма синтез-газу піролізу або одного кілограма димових газів на розрахункову зміну концентрації до норми, що забезпечує екологічну безпеку, крім уже відомих витрат на 1 кг CaO $Cost^{CaO} = 0,25$ УмГрОд/кг, необхідні додаткові витрати на матеріал (наприклад, нітрон). Також враховується час експлуатації рукавного фільтра, наведений до 1 кг газу, що очищається $Cost^{SF} = 0,1$ УмГрОд/кг.

Виходячи з оброблених даних, з урахуванням технологічності очищення, максимальні витрати на очищення від кислих газів визначаються:

$$Cost_{acid}^{max} = var_{acid}^i \cdot (Cost^{CaO} + Cost^{SF}).$$

Показники мають емпіричний характер і були отримані в результаті обробки даних:

$$var_{acid}^{HF} = 1; var_{acid}^{HCl} = 0,05; var_{acid}^{SO} = 0,065.$$

$$Cost_{acid}^i(C_{gas}^i) = Cost_{acid}^{max} \cdot C_{gas}^i / \Delta C_{max} \cdot e^{\frac{\Delta C_{max} - C_{gas}^i}{\Delta C_{max}}}.$$

2.4.3 Результати моделювання очищення від кислих газів

На основі модифікованої моделі процесу очищення, яка враховує витрати сорбентів для приведення отриманих вуглецево-водневих газів із класифікованих ТПВ основної групи до екологічно допустимого стану, отримані наступні результати щодо очищення сортованих груп ТПВ (табл. 2.5).

Результати моделювання процесу очищення від кислих газів різними способами, які враховують вміст (HF), (HCl) і (SO₂), отримані шляхом піролізу з мінімально допустимим нормуванням цих компонентів у викидах.

На рис.2.1 представлена залежність витрат Cost на сорбенти для очищення шламу переробки при піролізі від початкової питомої концентрації

кислого газу (HF) C_{acid} . ТПВ були попередньо відсортовані. Розрахунки представлені для одержаного 1 кг газу. Глибина його очищення відповідає екологічному регламенту.

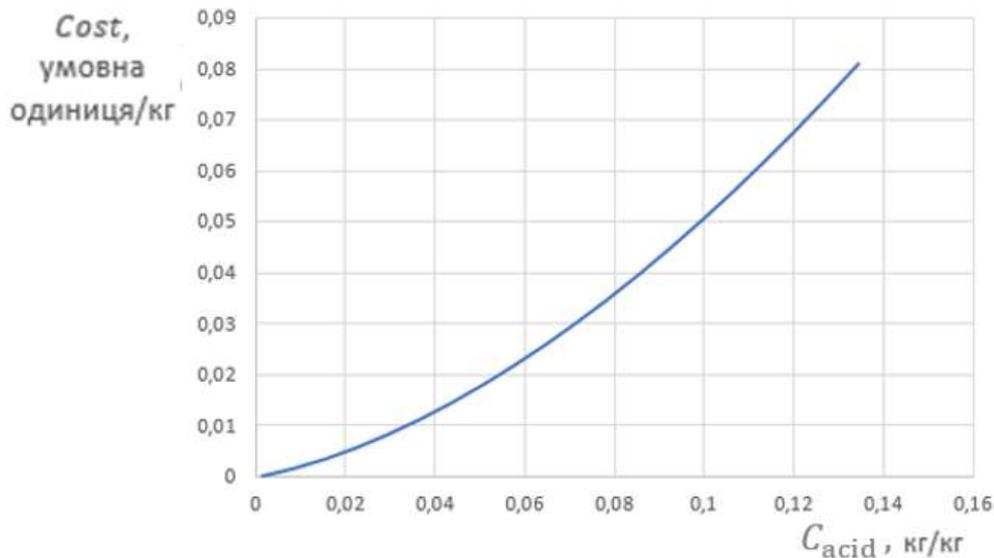


Рис.2.1 Результати моделювання очищення від кислого газу, в основі якого знаходиться (HF) з використанням сорбенту в процесі термічної переробки процесу піролізу [12].

За результатами моделювання можемо побачити, що якщо в шламі ТПВ міститься 0,13 кг речовин, що утворюють кислі гази, які необхідно сорбувати так, щоб на виході їх концентрація була близька до нуля, то для цього необхідно витратити близько 0,08 умовних вартісних одиниць придбання сорбуючої речовини.

Якщо ж шлам ТПВ, що містить 0,13 кг речовин, що утворюють кислі гази, необхідно сорбувати так, щоб їх містилося лише 0,07 кг в 1 кг отриманого газу, то для цього необхідно витратити близько $0,08 - 0,03 = 0,05$ умовних вартісних одиниць для придбання сорбуючої речовини.

На рис.2.2 представлена залежність витрат Cost на сорбенти та рукавний фільтр для очищення отриманого при піролізі ТПВ 1 кг газу від початкової питомої концентрації кислого газу (HF) C_{acid} . Глибина очищення відповідає екологічному регламенту.

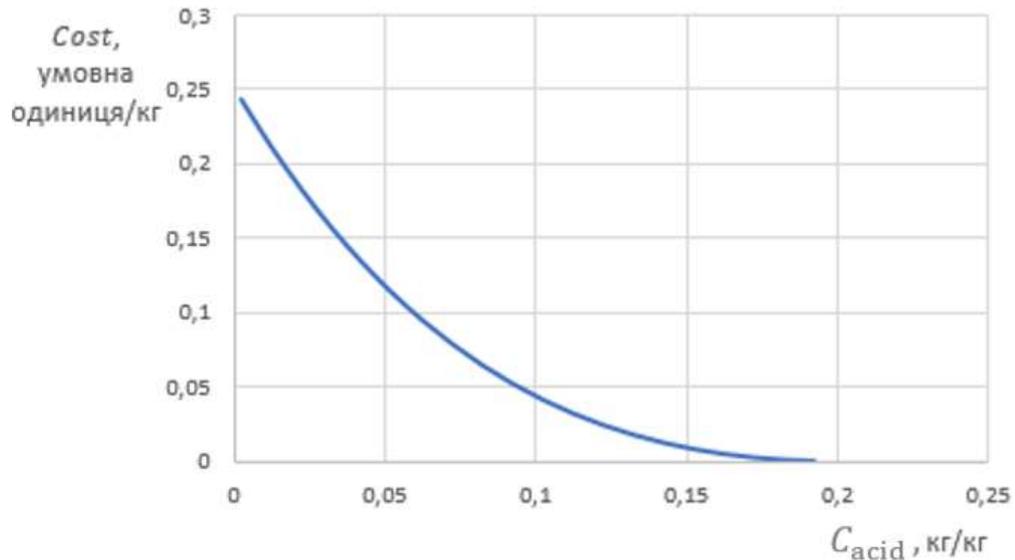


Рис. 2.2 Результати моделювання очищення від кислого газу, в основі якого знаходиться (HF) з використанням рукавного фільтра та сорбенту [12].

Виходячи з результатів моделювання, можна визначити, якщо в 1 кг отриманого газу міститься 0,19 кг речовин, що утворюють кислі газу, які необхідно сорбувати в рукавному фільтрі так, щоб на виході їхня концентрація була близька до нуля або не перебільшувала екологічний показник щодо цього виду. Для цього необхідно витратити близько 0,25 умовних вартісних одиниць для забезпечення роботи фільтра рукава.

Якщо 1 кг отриманого газу, що містить 0,19 кг речовин, що утворюють кислі газу, частково необхідно сорбувати в рукавному фільтрі так, щоб на виході була концентрація 0,05 кг кислого газу, для цього необхідно витратити близько $0,25 - 0,12 = 0,13$ умовних вартісних одиниць забезпечення роботи рукавного фільтра.

На рис. 2.3 показані результати модельного експерименту очищення, отриманого при піролізі ТПВ 1 кг кислого газу (HF), з використанням двох способів одночасно.

Експеримент складається з кількох етапів. На першому етапі визначаються витрати Cost на сорбенти для очищення шламу переробки. Умова зменшення кількості кислих газів виявляється в масовій концентрації на величину $\Delta C_{кисл}$, у разі на 0,01. На другому кроці визначаються витрати

Cost на сорбенти та рукавний фільтр для доочищення отриманого 1 кг газу з залишкової концентрації кислого газу до нульової величини або величини близької до екологічного регламенту. Потім витрати підсумовуються.

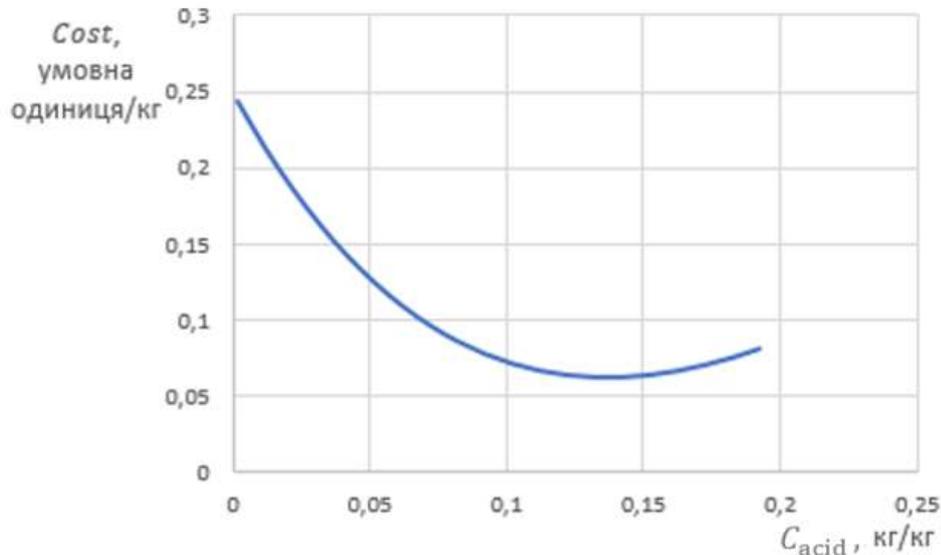


Рис.2.3. Результати моделювання очищення від кислого газу, в основі якого знаходиться (HF) з використанням сорбенту в процесі термічної переробки з використанням двох способів одночасно [12].

На всіх наступних кроках проводиться такий самий модельний розрахунок. На кожному кроці концентрація кислих газів зменшувалась при піролізі. Витрати за рахунок добавок сорбентів у шлам збільшувалися, а витрати на газоочищення сорбентами у рукавному фільтрі призводили до необхідної концентрації.

Таким чином, було досліджено всі варіанти між двома граничними моделями очищення, результати яких представлені на рис. 2 і 3. Такий обчислювальний експеримент показав, що для змішаної технології існує найкраща точка з точки зору очищення від кислих газів, коли можливе застосування різних способів очищення.

Аналогічний обчислювальний експеримент був проведений для очищення від кислих газів HCl та SO₂. Результати подано на рис.2.4.

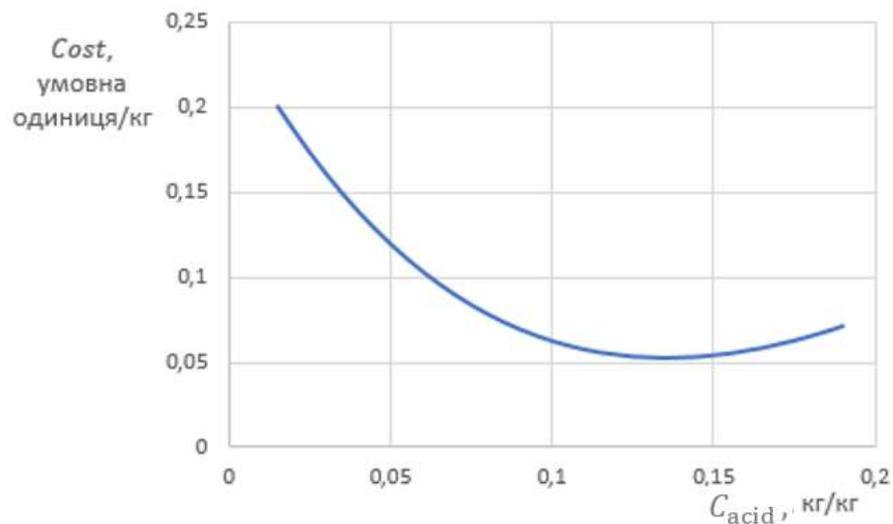
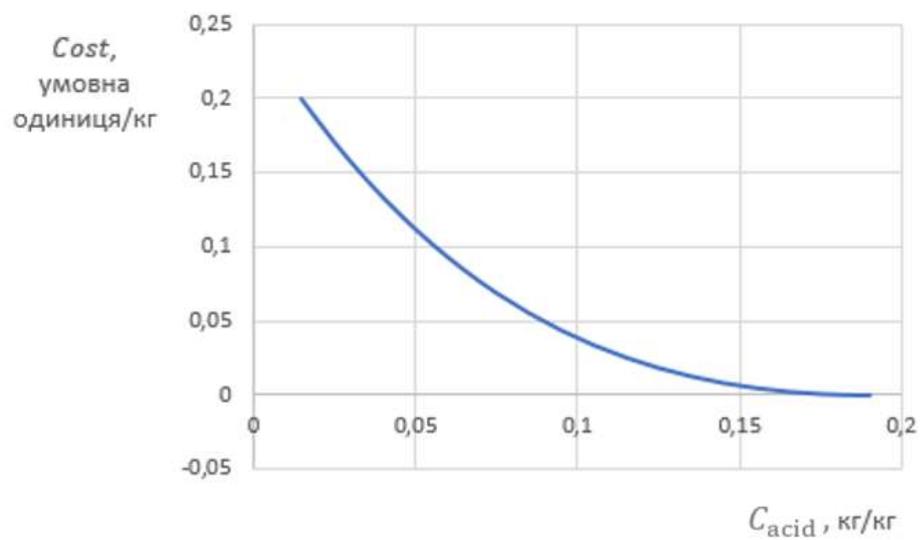
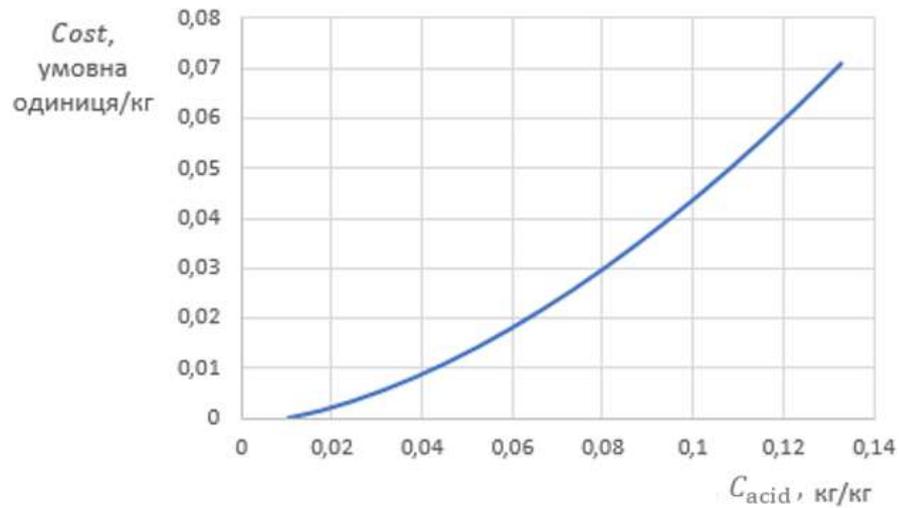


Рис. 2.4. Результати моделювання з очищення від кислого газу, в основі якого знаходиться (HCl) і (SO₂) з використанням сорбенту в процесі термічної переробки процесу піролізу (а) з використанням рукавного фільтра та сорбенту (б) з використанням двох способів одночасно (в) [12].

2.5 Комплексна технологічна схема методів термічної деструкції ТПВ

На основі сформульованого правила прийняття рішення з вибору способу переробки ТПВ з дотриманням екологічних стандартів розроблено комплексна технологічна схема методів термічної деструкції ТПВ [12] (рис. 2.5).

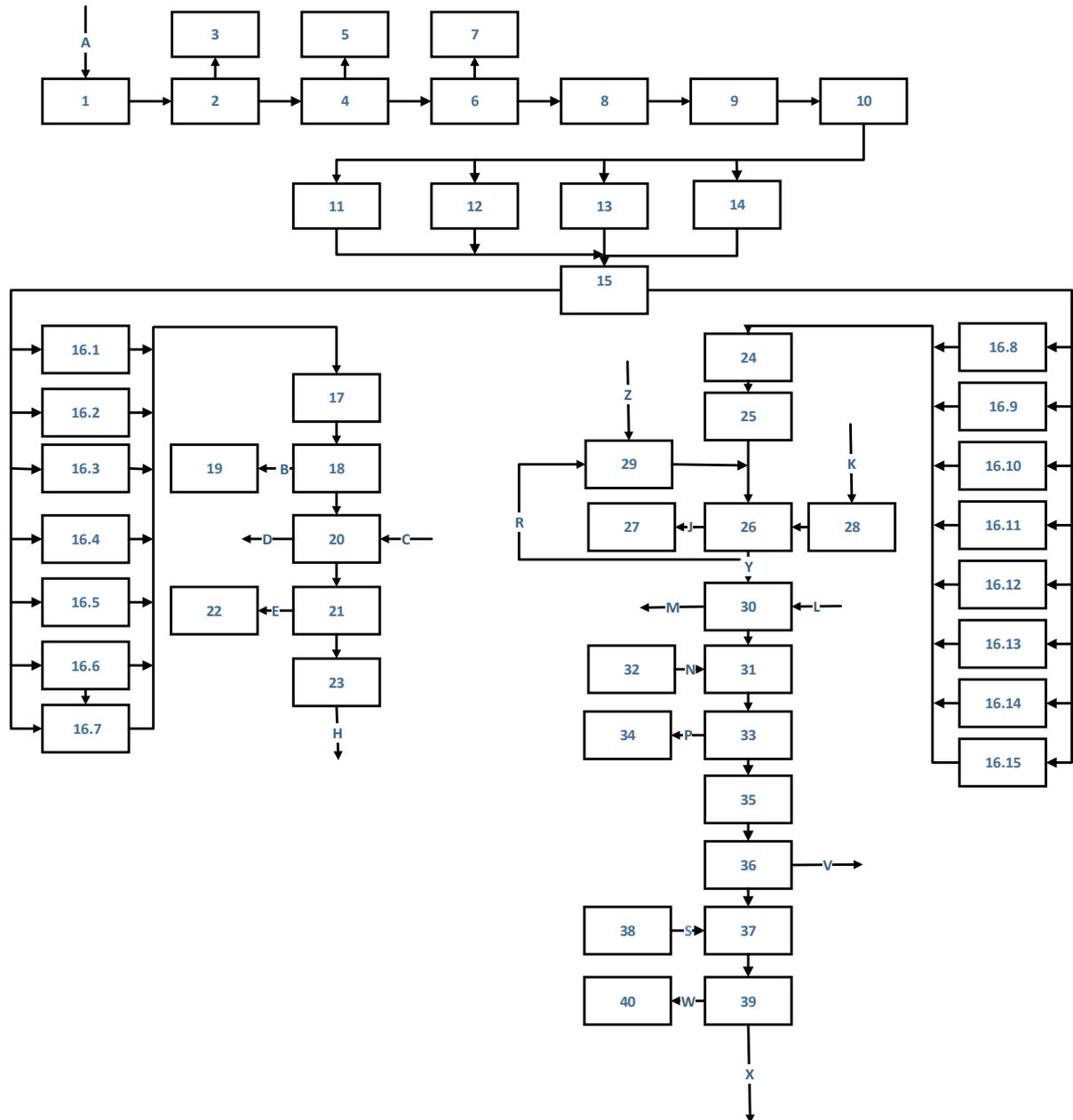


Рис.2.5 Комплексна технологічна схема методів термічної деструкції при переробці ТПВ [12].

2.5.1 Технічні засоби для переробки ТПВ

Вібраційний сепаратор або гуркіт (1) використовується для фільтрації дрібних фракцій ТПВ: земля, пил і т.д. Далі слідує магнітний сепаратор (2) для автоматичного відбору магнітних матеріалів-сталі, які направляються в бункер (3). Вихрострумний сепаратор (сепаратор кольорових металів) (4) використовується для автоматичного відбору немагнітних металів: мідь, алюміній і т.д., що направляються в бункер (5). Сепаратор циклон (6) відокремлює силікатні фрагменти ТПВ, які направляються в бункер силікатних матеріалів (7).

На наступному етапі ТПВ надходять на дробильну установку (8). Підготовлені ТПВ прямують у приймальний дозуючий бункер (9), з якого порція суміші відправляється в блок сортування на основі якісного аналізу (10), де обсяг суміші ТПВ, на основі запропонованого у розділі 2.1.1 методу класифікації ТПВ за характерним хімічним складом, ділиться на 4 групи (таблиця 2.4), залежно від переважання компонентів А, В, С або D. Далі - розподіляється за чотирма бункерами (11), (12), (13), (14) відповідно.

При ізотермічному розкладанні, для отримання класифікаційних ознак, чотири певні групи (А,В,С,Д), що становлять загальний обсяг ТПВ, можуть утворювати 11 варіантів різних сумішей, які ідентифікуються в блоці сортування (15), на основі кількісного аналізу, умовні формули яких наведені в таблиці 2.5 і які є імітаційними моделями різних груп ТПВ. Такий метод класифікації при ідентифікації проб твердих побутових відходів дозволяє виділяти групи, що утворюють кислі гази.

Суміші розподіляються залежно від результатів аналізу один із бункерів (16.1-16.15): бункер ТПВ групи суміші А (16.1), бункер ТПВ групи суміші В (16.2), бункер ТПВ групи суміші С (16.3), бункер ТПВ групи суміші А+В (16.4), бункер ТПВ групи суміші А+С (16.5), бункер ТПВ групи суміші В+С (16.6), бункер ТПВ групи суміші А+В+С (16.7), бункер ТПВ групи суміші D (16.8), бункер ТПВ групи суміші А+D (16.9), бункер ТПВ групи суміші В+D (16.10), бункер ТПВ групи суміші С+D (16.11), бункер ТПВ групи суміші

A+B+D (16.12), бункер ТПВ групи суміші A+C+D (16.13), бункер ТПВ групи суміші B+C+D (16.14), бункер ТПВ групи суміші A+B+C+D (16.15).

2.5.2 Етапи термічної утилізації груп ТПВ, які не утворюють при спалюванні кислі гази

Розглянемо етапи термічної утилізації груп ТПВ, які не утворюють при спалюванні кислі гази. Суміші з бункерів (16.1-16.7), що утворюють цю групу, відправляються дозуючий бункер (17) компонент ТПВ. Далі – в установку для спалювання (18). Після термічної деструкції утворюється вуглецевий залишок (В), який відправляється в бункер (19), та димові гази, які використовуються для нагрівання води (20), а далі – піддаються очищенню. Застосовується очищення димових газів, яке включає механічне фільтрування в циклоні (21). Пил осідає в накопичувальний бункер (22). Далі слідує витяжний вентилятор (23), який направляє розкислений продукт-газ в атмосферу (Н).

2.5.3 Етапи термічної утилізації груп ТПВ, що утворюють при спалюванні кислі гази

Розглянемо етапи термічної утилізації груп ТПВ, що утворюють при спалюванні кислі гази. Суміші з бункерів (16.8-16.15), що утворюють цю групу, відправляються в дозуючий бункер (24) компонент ТПВ. Далі - проміжний бункер (25), днищем якого служить пластинчастий живильник, призначений для завантаження ТПВ в піч піролізу (26). Крім того, з бункера розчинних матеріалів (28) в піч подається лужне з'єднання CaO або Na₂O (К). Також з нагрівача повітря (29) в піч піролізу подається регенеративне підігріте повітря (Z). При цьому утворюється піролізний газ поділяється на 2 потоки: який подається споживачеві (Y); і який надходить по лінії рециркуляції на вхід у реактор для осушення та попереднього підігріву ТПВ (R). Твердий вуглецевмісний продукт - вуглецевий залишок (J) відправляється в бункер (27). Піролізний газ (Y) використовується для нагрівання води (30), а далі - піддається очищенню. При вихідних концентраціях кислих газів (SO₂, HCl,

HF) у продукт-газі проходить його очищення методом сорбції, шляхом керованого введення з бункера (32) сухого порошку $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або Na_2CO_3 (N) безпосередньо в газопровід у пристрій звуження (31). Далі відбувається обробка в циклоні з рукавним фільтром (33) і фільтрація продуктів сорбції та винесений пил з піролізу печі (P) твердих частинок у бункер (34). Витяжний вентилятор (35) запобігає витоку неочищених димових газів в навколишнє середовище та його дифузного поширення. Газ надходить на дизель-генератор (36) і електроенергія (V), що виробляється, надходить споживачеві. На виході з генератора відбувається додаткове очищення газів методом сорбції, шляхом керованого введення з бункера (38) сухого порошку $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або Na_2CO_3 (S) безпосередньо в газопровід у пристрій звуження (37). Далі відбувається обробка в циклоні з рукавним фільтром (39). Продукти сорбції (W) відправляються у бункер (40), очищений газ (X) – в атмосферу.

Беручи до уваги результати дослідження, які було отримано в другому розділі, можна констатувати, що знайшла подальший розвиток імітаційна модель сортування ТПВ на основі ідентифікації порції досліджуваної сировини при класифікації за прийнятими ознаками на групи заданого складу. Цей склад визначається брутто-формулою сировини для подальшого використання в методах термічної деструкції для умови дотримання екологічних показників. Це дозволило розробити автоматизований метод сортування за групами ТПВ, що дозволить здійснити їхню подальшу переробку з максимальною ефективністю та дотриманням екологічних показників залежно від заданих характеристик ідентифікації кожної складової.

2.6 Висновки до розділу

1. Запропоновано розвиток методу класифікації твердих побутових відходів та способу їхньої ідентифікації, який дозволив виділити групи, що утворюють кислі гази. Основу метода складає імітаційна модель, яку представлено табличною формою брутто-формул можливих сполук, з яких утворюються об'єми твердих побутових відходів. За прийнятими даними

утворено 15-ть сполук у вигляді брутто-формул. Ідентифікація визначених сполук, як якісна так і кількісна відбувається термохімічним способом, що робить можливим пошук речовин, які утворюють кислі гази при переробці методами термічної деструкції.

2. Розроблено метод сортування ТПВ для можливості подальшої переробки кожної групи з максимальною ефективністю та дотриманням екологічних стандартів. В основу метода покладено технологічний спосіб проведення сортування; метод сортування сировини-переробки, в який інтегровано вимірювальні пристрої для забезпечення заданих характеристик ідентифікації за класифікаційними ознаками імітаційної моделі; принцип застосування вимірювальних пристроїв в залежності від типу задачі ідентифікації за якісним або кількісним показником.

3. Розроблено імітаційну модель процесу очищення вуглецево-водневих газів, що утворюються в результаті термічної деструкції ТПВ, що включають компоненти, що утворюють кислі гази, з дотриманням екологічних стандартів. Запропоновано формули оцінки показника ефективності та оцінки питомих витрат термічної деструкції різних груп відсортованих ТПВ для подальшого формування критерію вибору між способами термічної деструкції: спалювання ТПВ в атмосфері повітря або піролізу з отриманням синтез-газу.

4. На основі запропонованого методу розрахунку витрат на забезпечення екологічно регламентованих показників, які використовують імітаційну модель процесу очищення, було сформульовано правило прийняття рішення для формування структури технічних засобів для вибору способу переробки ТПВ різними методами термічної деструкції при дотриманні екологічних стандартів.

5. Сформовано структуру технічних засобів та розроблено комплексну технологічну схему методу термічної утилізації, яка забезпечує дотримання екологічних норм на викиди до навколишнього природного середовища з використанням вторинних енергетичних ресурсів, отриманих з ТПВ.

РОЗДІЛ 3. МЕТОД КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПІРОЛІЗУ ТПВ ЗМІННОГО СКЛАДУ ТА ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Метою розділу є розробка метода керування піролізною установкою з визначенням оптимального співвідношення витрат повітря/ТПВ, що забезпечує високий рівень робастності, для розв'язання задачі керування установкою піролізу відходів для різних співвідношень класифікованих ТПВ з різними значеннями вологості.

Для розв'язання поставленої задачі необхідно:

- розробити метод нечіткого керування процесом піролізу ТПВ змінного складу;
- розробити структуру АСК піролізною установкою;
- розробити нечітку підсистему визначення оптимальних параметрів процесу піролізу:
 - дослідити ефективність методу нечіткого керування процесом піролізу ТПВ змінного складу.

Засоби управління в більшості випадків дозволяють вирішувати переважно окремі завдання автоматизації (стабілізація температурного режиму, рівня завантаження реактора, швидкості подачі ТПВ), а для істотного підвищення ефективності процесу термічної деструкції ТПВ необхідно здійснювати комплексний контроль роботи установки піролізу із забезпеченням найкращих значень ряду показників. А саме, забезпечити оптимальне співвідношення витрат повітря/ТПВ та відповідний температурний режим для подачі споживачу необхідної витрати вихідного піролізного газу з максимальною теплотворною здатністю [121]. Існуюча проблема значно ускладнюється при зміні складу та вологості вхідної сировини [111]. Використання будь-яких типів екстремальних регуляторів не дозволяє досить точно визначити оптимальне співвідношення повітря/ТПВ через великі похибки визначення вимірюваного параметра при наближенні до

точки екстремуму [122-124]. Додаткові труднощі створює також можливість лише приблизного визначення процентного співвідношення окремих компонентів у складі сировини.

Як показує ряд сучасних досліджень, для автоматизації складних теплоенергетичних та хімічних об'єктів, підвищення ефективності роботи та надійності, у багатьох випадках необхідна розробка нових методів управління [14],[77, 78]. Для керування нелінійними та нестационарними установками, характеристики яких можна визначити лише приблизно, а параметри можуть змінюватися випадковим чином, можуть ефективно застосовуватись принципи інтелектуального керування на основі нечіткої логіки [74, 75, 79, 80]. Нечіткі системи дозволяють ефективно використовувати експертну інформацію та експериментальні дані, реалізовувати складні та гнучкі стратегії управління та прийняття рішень, мають високу логічну прозорість та інтерпретативність, а також можуть ефективно навчатися як нейронні мережі на основі навчальних вибірок або цільових функцій. Тому доцільно здійснити створення перспективних систем управління піролізними установками, що працюють в умовах зміни складу та вологості вхідних ТПВ, що ґрунтуються на принципах нечіткого керування.

3.1 Метод нечіткого керування процесом піролізу ТПВ змінного складу

Перед викладом основних аспектів запропонованого методу нечіткого керування доцільно розглянути короткий опис, особливості роботи та основні завдання керування узагальненою піролізною установкою, яка використовується для термічної деструкції ТПВ.

3.1.1 Особливості та завдання керування узагальненої піролізної установки термічної деструкції ТПВ

На рисунку 3.1 наведено 3D-модель (а) та принципову схему (б) узагальненої піролізної установки, яка використовується для термічної утилізації твердих побутових відходів.

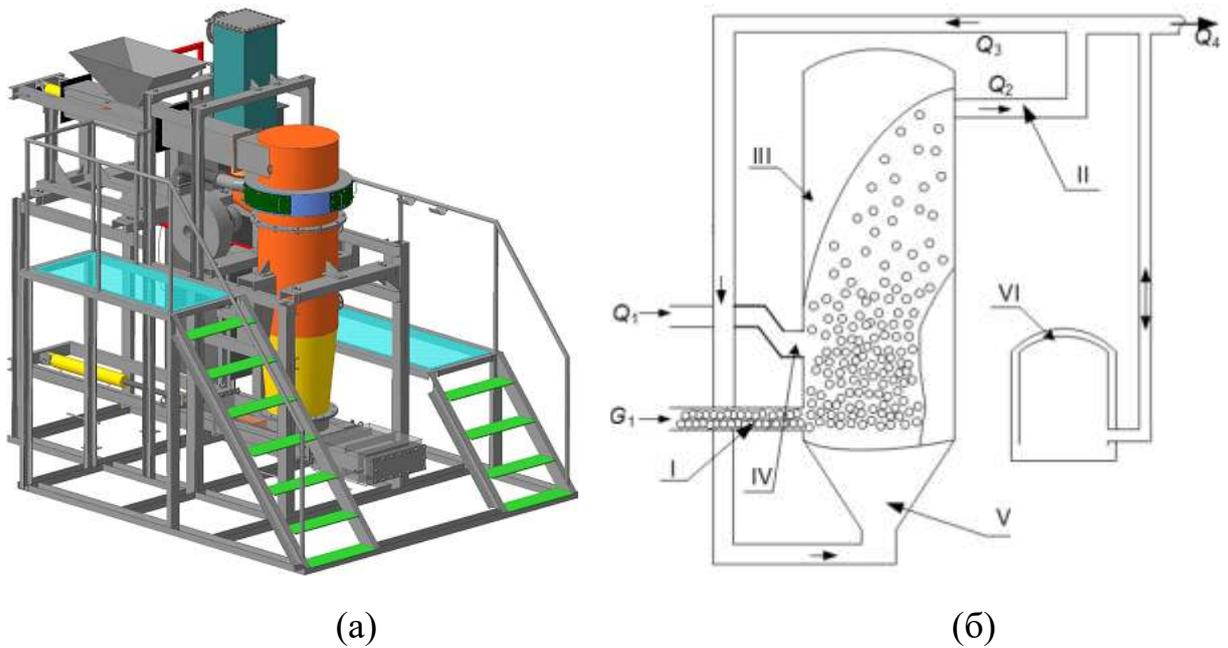


Рис. 3.1 Узагальнена піролізна установка: (а) 3D модель;
(б) принципова схема [14].

Піролізна установка, зображена на рис. 3.1, працює наступним чином [14]. ТПВ з витратою G_1 надходять на вхід в реактор через колектор I. У свою чергу, через збірник IV подається необхідна кількість повітря з витратою Q_1 для здійснення процесу піролізу в певному режим. Основний процес піролізу відбувається в реакторі III, в результаті якого утворюється піролізний газ з витратою Q_2 , який виходить через колектор II на виході з реактора. Крім того, утворений піролізний газ поділяється на 2 потоки: з витратою Q_4 , який надходить до споживача; з витратою Q_3 , яка надходить по лінії рециркуляції на вхід V в реактор для сушіння та попереднього підігріву ТПВ. Крім того, після піролізної установки встановлюється газгольдер VI, що дозволяє забезпечити наявність буферної ємності для згладжування потоку піролізного газу при різких змінах його витрати.

Таким чином, у стаціонарному режимі роботи представлена піролізна установка дає можливість повністю газифікувати органічну складову ТПВ із заданим складом, розраховуючи мінімально необхідну кількість повітря та регулюючи його подачу. Для найбільш ефективної переробки відходів і отримання піролізного газу з найбільшою теплотворною здатністю необхідно

забезпечити подачу такої кількості повітря, щоб співвідношення витрат повітря/ТПВ було оптимальним. Крім того, оптимальне значення цього коефіцієнта суттєво залежить від типу відходів, що переробляються. У свою чергу, розглянута піролізна установка (рис. 3.1) може переробляти 4 основних види ТПВ: 1) вуглеводневі (C_mH_m); 2) вуглеводні, що містять кисень ($\text{C}_n\text{H}_n\text{O}_f$); 3) вуглеводні, що містять кисень і азот ($\text{C}_w\text{H}_w\text{O}_q\text{N}_k$) 4) вуглеводні, що містять активні елементи, що утворюють «кислі гази» ($\text{C}_a\text{H}_a\text{F}_x$, $\text{C}_b\text{H}_b\text{Cl}_y$, $\text{C}_d\text{H}_d\text{S}_z$) [112]. Але, оскільки на практиці точне сортування відходів є досить складним, то при використанні якогось одного виду ТПВ з перерахованих, у ньому можуть міститися невеликі домішки ТПВ інших видів. Наприклад, відходи, що надходять, можуть складатися більше ніж на 90% з першого типу і до 10% в цілому з другого, третього і четвертого видів. Також можуть бути суміші з основним складом якихось двох видів ТПВ і з невеликими домішками двох інших типів. Наприклад, така суміш ТПВ може складатися більше ніж на 45% з першого типу, більше 45% з третього типу і до 10% в сумі з другим і четвертим типами. Також на ефективність процесу термічної деструкції суттєво впливає вологість ТПВ окремих їхніх видів та їхніх сумішей.

Для забезпечення високої ефективності термічної деструкції відходів необхідно здійснювати належне автоматичне керування процесом піролізу з визначенням оптимального коефіцієнта витрат повітря/ТПВ для різних співвідношень розглянутих видів сумішей зі змінним значеннями вологості.

Таким чином, можна виділити наступні основні завдання автоматизованого керування цією піролізною установкою:

- 1) контроль ТПВ G_1 і подачі повітря Q_1 для забезпечення виробництва необхідної кількості піролізного газу Q_4 для споживача;
- 2) контроль співвідношення повітря/ТПВ α для ТПВ змінного складу і вологості для максимізації теплотворної здатності Q_i^r отриманого піролізного газу;
- 3) стабілізація необхідного температурного режиму процесу піролізу;

4) стабілізація необхідного значення рівня L_G в газгольдері.

Для реалізації вищезазначених задач багатокомпонентного керування піролізною установкою необхідно застосувати високоефективний метод нечіткого керування, який представлений у наступному підрозділі.

3.1.2. Основні аспекти методу нечіткого керування процесом піролізу ТПВ змінного складу

Керування піролізною установкою у стаціонарному режимі

У стаціонарному режимі роботи піролізної установки кількість утвореного піролізного газу Q_4 визначається сумою значень витрат ТПВ і повітря, які надходять в реактор [111] :

$$Q_4 = G_1 + Q_1 \quad (3.1)$$

Таким чином, щоб забезпечити бажане значення витрати піролізного газу Q_4 , яке вимагає споживач, необхідно контролювати подачу ТПВ G_1 і витрату повітря Q_1 , щоб виконувалося рівняння (3.1).

При цьому для деструкції відходів різного складу в оптимальному режимі необхідно дотримуватись певного співвідношення між надходженням ТПВ G_1 і потоком повітря Q_1 . Для цього доцільно ввести питомий коефіцієнт K_α , який визначатиме витрату ТПВ і повітря залежно від необхідної кількості піролізного газу Q_4 на виході. Використовуючи коефіцієнт K_α рівняння (3.1) набуває вигляду

$$Q_4 = G_1 + Q_1 = Q_4 K_\alpha + Q_4 (1 - K_\alpha), \quad (3.2)$$

де K_α теоретично може приймати значення від 0 до 1.

Таким чином, відповідно до запропонованого методу на основі рівняння (3.2) необхідні значення витрат ТПВ і повітря розраховуються за рівняннями (3.3) і (3.4) відповідно:

$$G_1 = Q_4 K_\alpha, \quad (3.3)$$

$$Q_1 = Q_4 (1 - K_\alpha). \quad (3.4)$$

Крім того, питомий коефіцієнт K_α корелює зі значенням співвідношення повітря/ТПВ α таким чином:

$$K_\alpha = \frac{1}{1+\alpha}. \quad (3.5)$$

Оскільки для ефективного здійснення процесу піролізу органічних відходів коефіцієнт α має бути в межах від 0,3 до 0 [111], залежно від виду ТПВ, то коефіцієнт K_α може змінюватись від 0,769 до 1 відповідно до з рівнянням (3.5).

Таким чином, для вирішення перших двох завдань автоматизованого керування піролізною установкою необхідно розрахувати сигнали керування витратами ТПВ u_{G1} і повітря u_{Q1} відповідно до рівнянь (3.6) і (3.7) наступним чином :

$$u_{G1} = u_{Q4} K_\alpha; \quad (3.6)$$

$$u_{Q1} = u_{Q4} (1 - K_\alpha), \quad (3.7)$$

де u_{Q4} – сигнал, що відповідає заданому значенню витрати піролізного газу Q_4 , необхідному споживачу .

У свою чергу, сигнал u_{Q4} повинен бути встановлений оператором системи керування на верхньому рівні. Оптимальні значення коефіцієнта K_α слід розраховувати для ТПВ певного складу та залежно від вологості на основі математичної моделі процесу піролізу [111].

Реалізація таких регулюючих впливів на основі рівнянь (3.6) та (3.7) дозволить ефективно керувати піролізною установкою в стаціонарному режимі. У свою чергу, для забезпечення ефективної автоматизації процесу піролізу на перехідних режимах, додатково до розглянутих питань, необхідно вирішувати задачі, реалізація яких розглядається у наступному розділі.

Керування піролізною установкою на перехідних режимах

Для стабілізації температурного режиму процесу піролізу необхідно здійснювати додатковий контроль витрати повітря на перехідних режимах.

У свою чергу, для стабілізації необхідного значення рівня L_G в газгольдері необхідно здійснювати додатковий контроль надходження ТПВ в реактор на перехідних режимах.

Таким чином, з огляду на вищевикладене рівняння (3.6) і (3.7) матимуть вигляд:

$$u_{G1} = u_{Q4}K_\alpha + u_{LC} = u_{Q4}K_\alpha + f(\varepsilon_L); \quad (3.8)$$

$$u_{Q1} = u_{Q4}(1 - K_\alpha) + u_{TC} = u_{Q4}(1 - K_\alpha) + f(\varepsilon_T), \quad (3.9)$$

де u_{LC} і u_{TC} – керуючі сигнали регулятора рівня (LC) і терморегулятора (TC), які повинні стабілізувати необхідне значення рівня L_G в газгольдері та температуру реактора на перехідних режимах; ε_L – похибка регулювання рівня, яка визначається відхиленням реального значення рівня L_R в газгольдері від заданого L_{GS} , $\varepsilon_L = L_{GS} - L_R$; ε_T – похибка регулювання температури, яка визначається відхиленням реального значення температури T_R в реакторі від заданої T_S , $\varepsilon_T = T_S - T_R$.

Задане значення рівня газгольдера L_{GS} встановлюється оператором системи керування на верхньому рівні. Тоді як значення температури T_S необхідно встановити таким чином, щоб воно відповідало оптимальному значенню коефіцієнта K_α залежно від складу ТПВ та вологості.

Питомий коефіцієнт K_α слід визначати таким чином, щоб забезпечити максимально можливе значення теплотворної здатності Q_i^r одержуваного піролізного газу і водночас найвищу температуру T в реакторі для інтенсифікації процесу піролізу.

Розрахунок теплотворної здатності

У стаціонарному режимі роботи піролізної установки, теплотворної здатності Q_i^r отриманого піролізного газу та температури T процесу піролізу залежно від подачі ТПВ G_1 і витрати повітря Q_1 можна розрахувати на основі виразів (3.10) і (3.11) відповідно [101]:

$$Q_i^r = Q_{i0}^r (1 - K_c (\frac{Q_1}{G_1 V_0})^2); \quad (3.10)$$

$$T = k_G G_1 + k_Q Q_1, \quad (3.11)$$

Де Q_{i0}^r теплотвірна здатність ТПВ; V_0 – об'єм повітря, необхідний для піролізу 1 моль ТПВ; k_c , k_G і k_Q – коефіцієнти пропорційності, які залежать від питомого складу ТПВ та від їхньої вологості,

$$k_c = f(Q_{W1}, Q_{W2}, Q_{W3}, Q_{W4}, h_W); \quad (3.12)$$

$$k_G = f(Q_{W1}, Q_{W2}, Q_{W3}, Q_{W4}, h_W); \quad (3.13)$$

$$k_Q = f(Q_{W1}, Q_{W2}, Q_{W3}, Q_{W4}, h_W); \quad (3.14)$$

Де Q_{W1} , Q_{W2} , Q_{W3} , Q_{W4} , – відсотковий вміст ТПВ 1, 2, 3 і 4 в суміші; h_W – вологість ТПВ.

де,

$$Q_{W1} + Q_{W2} + Q_{W3} + Q_{W4} = 100\% \quad (3.15)$$

Наприклад, для випадку, коли суміш складається зі 100% відходів 2-го виду з 15% вологістю ($Q_{W1} = 0\%$; $Q_{W2} = 100\%$; $Q_{W3} = 0\%$; $Q_{W4} = 0\%$; $h_W = 15\%$), коефіцієнти приймають такі значення: $k_c = 0,27$; $k_G = 300$; $k_Q = 570$.

Як видно з рівнянь (3.10) і (3.11), теплотворна здатність Q_i^r піролізного газу, що утворюється, зростає зі зменшенням витрати повітря Q_1 в процесі піролізу, і максимального значення Q_{i0}^r можна досягти при $Q_1 = 0$. Однак, при зниженні витрати повітря температура T в реакторі також зменшується, і при її нульовому значенні ($Q_1 = 0$) не вистачить енергії для здійснення процесу піролізу. Тому доцільно вибирати значення коефіцієнта K_α таким чином, щоб дотримувався компроміс між теплотворною здатністю Q_i^r і температурою T процесу піролізу. Таким чином, доцільно ввести цільову функцію J (3.16), оптимальне значення якої відповідатиме оптимальному значенню коефіцієнта K_α для певного складу ТПВ та їхньої вологості.

$$J = Q_i^r(K_\alpha) + 0,3 \frac{T(K_\alpha)}{T_{max}} \rightarrow \max, \quad (3.16)$$

де T_{max} - максимальне значення температури, відповідні максимальні значення витрат ТПВ і повітря для певного складу й вологості.

Для знаходження коефіцієнта K_α , що відповідає оптимальному значенню цільової функції (3.16) для певного складу ТПВ і вологості, доцільно використати математичну модель процесу піролізу [111]. Так, наприклад, для складу, описаного вище ($Q_{W2} = 100\%$; $h_W = 15\%$), розрахункова залежність цільової функції J (3.16) на коефіцієнт K_α має вигляд, наведений на рис. 3.2.

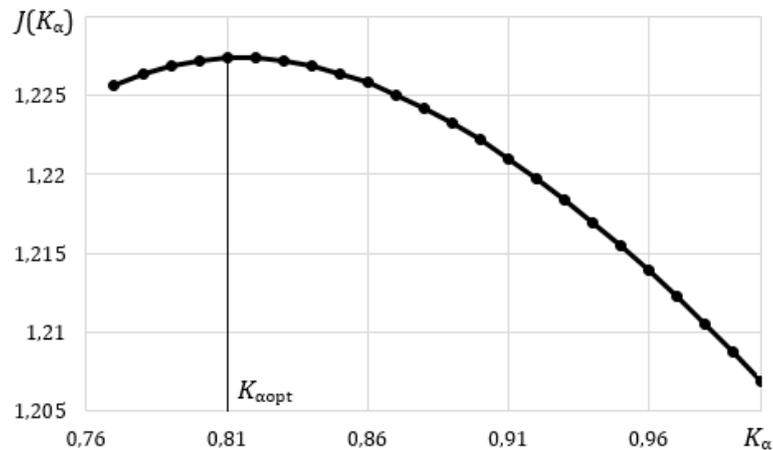


Рис. 3.2. Залежність цільової функції J від коефіцієнта K_α ($Q_{W2} = 100\%$; $h_W = 15\%$) [111]

Як видно з графіка на рис. 3.2, оптимальне значення коефіцієнта $K_{\alpha opt}$ для даного складу та вологості ТПВ дорівнює 0,81. У свою чергу температура встановлюється значенням T_S , що відповідає заданому оптимальному значенню коефіцієнта K_α дорівнює 703 °С.

Математична модель процесу піролізу [111], на основі якого розраховується оптимальне значення цільової функції, включає рівняння хімічної кінетики та потребує значних обчислювальних ресурсів і витрат часу для визначення необхідних значень коефіцієнта K_α . Це викликає певні труднощі при його використанні в режимі реального часу в системі автоматизації піролізної установки в процесі керування. Тому доцільно провести попередній розрахунок оптимальних значень коефіцієнта K_α і температури T_S для основних можливих складів ТПВ і використати наведені

значення в процесі контролю. Оскільки склад відходів можна визначити лише приблизно, то для апроксимації попередніх розрахункових даних доцільно використовувати нечітку підсистему [14],[15], яка визначить значення коефіцієнта K_α і температури T_S при різних відсотках відходів і вологості.

3.2 Структура АСК піролізної установки

Таким чином, враховуючи все вищесказане, для реалізації запропонованого методу нечіткого керування АСК піролізною установкою матиме структуру, представлену на рис. 3.3.

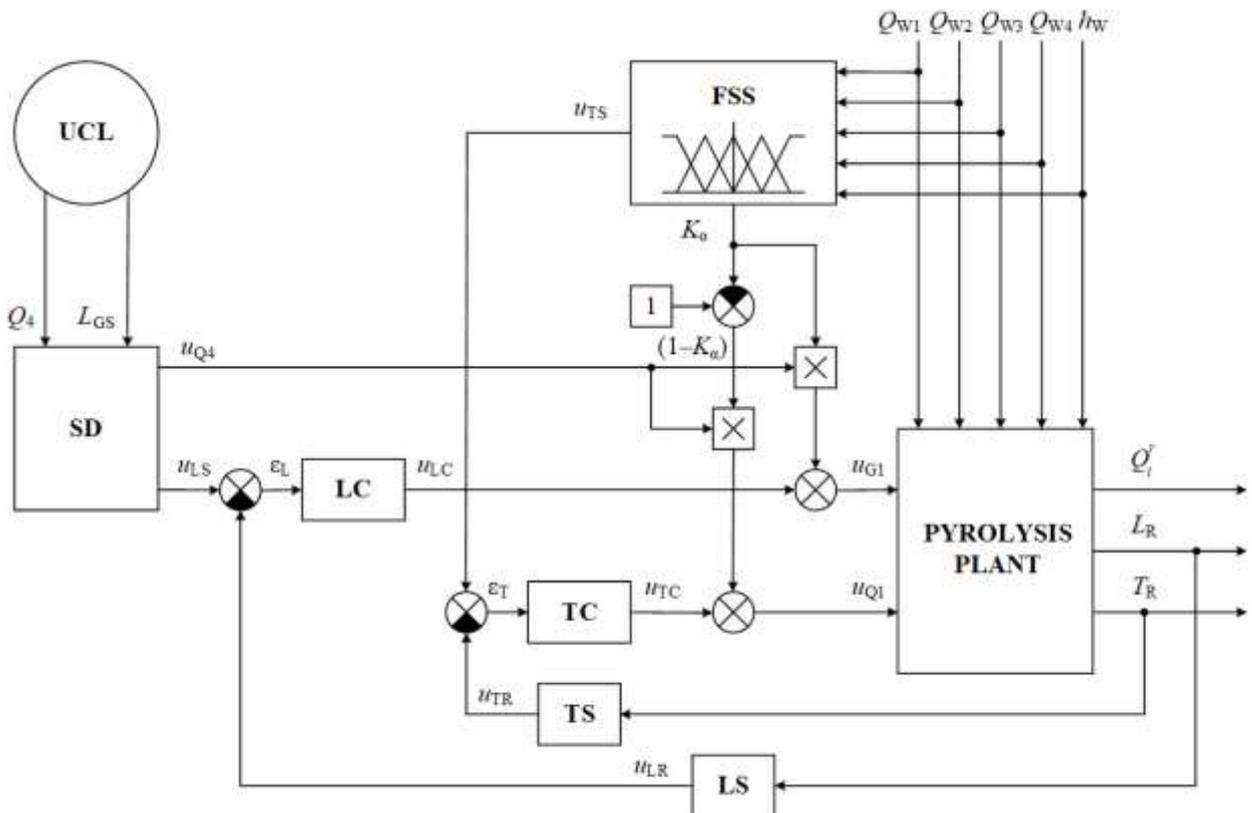


Рис. 3.3 Структура АСК піролізної установки [14]

У свою чергу, на рис. 3.3 прийняті наступні позначення : UCL – контроль верхнього рівня; SD – установчий пристрій; FSS – нечітка підсистема; TS – датчик температури; LS – датчик рівня; u_{LC} і u_{TC} – сигнали, що відповідають заданим значенням рівня L_{GS} і температури T_S ; u_{LR} і u_{TR} – сигнали, які

відповідають реальним значенням рівня L_R і температури T_R , що вимірюються датчиками LS і TS.

Для визначення оптимальних значень коефіцієнта K_α і заданої температури T_S у цій системі використовується нечітка підсистема типу Такагі-Сугено, яка реалізує такі залежності:

$$K_\alpha = f(Q_{W1}, Q_{W2}, Q_{W3}, Q_{W4}, h_W); \quad (3.17)$$

$$T_S = f(Q_{W1}, Q_{W2}, Q_{W3}, Q_{W4}, h_W); \quad (3.18)$$

Далі в підрозділі 3.3 представлена розробка нечіткої підсистеми, яка визначає оптимальні значення коефіцієнта K_α і температури T_S процесу піролізу залежно від складу ТПВ і вологості.

3.3 Нечітка підсистема визначення оптимальних параметрів процесу піролізу

Для дослідження нечіткої підсистеми в програмному пакеті MATLAB/Simulink використано розроблений спеціалізований пакет Fuzzy Logic Toolbox, який є спеціалізованим набором функцій для аналізу, проектування та моделювання систем, створених на основі теорії нечітких множин. У представленій роботі використано систему інференції Сугено (Sugeno's fuzzy inference method) – вихідна величина є константою або лінійною комбінацією вхідних змінних для кожного правила [14, 16].

Представлена нечітка підсистема типу Такагі-Сугено має п'ять вхідних змінних ($Q_{W1}, Q_{W2}, Q_{W3}, Q_{W4}, h_W$), де $Q_{W1}, Q_{W2}, Q_{W3}, Q_{W4}$ – процентний вміст ТПВ 1-го, 2-го, 3-го та 4-го типів у суміші; h_W – вологість ТПВ.

Та дві вихідних змінних ($K_\alpha; T_S$). Питомий коефіцієнт K_α визначається таким чином, щоб забезпечити максимально можливе значення теплотворної здатності Q_i^r одержуваного піролізного газу й водночас найбільшу температуру T_S в реакторі для інтенсифікації процесу піролізу.

В основі нечіткої логіки лежать такі основні елементи:

– фазифікація – виведення нечіткої множини, що відповідає певному значенню функції приналежності, що використовується в затвердженнях правил;

– оператор нечіткого висновку – це оператор, який виконує певні дії над нечіткою множиною на основі закладених у нього баз правил, унаслідок чого відбувається формування нечіткого логічного висновку;

– дефазифікація – процес, переходу від функції належності вихідний лінгвістичної змінної до її чіткого (числового) значення. Мета дефазифікації полягає в тому, щоб, використовуючи результати акумуляції всіх вихідних лінгвістичних змінних, отримати кількісні значення для кожної вихідної змінної.

На етапі фазифікації встановлюється відповідність між конкретним значенням окремої вхідної змінної системи нечіткого виведення та значенням функції належності відповідного їй терму вхідної лінгвістичної змінної.

Лінгвістичні змінні:

Q_{W1} – процентний вміст вуглеводневих (CH_m);

Q_{W2} – процентний вміст вуглеводневих, що містять кисень ($CH_n O_f$);

Q_{W3} – процентний вміст вуглеводневих, що містять кисень і азот ($CH_w O_q N_k$)

Q_{W4} – відсотковий вміст вуглеводневих, що містять активні елементи, що утворюють «кислі гази» ($CH_a F_x, CH_b Cl_y, CH_d S_z$)

Для фазифікації перших чотирьох вхідних змінних ($Q_{W1}, Q_{W2}, Q_{W3}, Q_{W4}$) використовуються 3 лінгвістичні терми: S – малий; A – середній; L – великий.

Для фазифікації п'ятої вхідної змінної h_W – вологість ТПВ, використовуються 4 лінгвістичні терми: L – низький; A – середній; AA – вище середнього; H – високий.

У свою чергу, для всіх лінгвістичних термів вибирається трикутна функція належності. Зовнішній вигляд наведених лінгвістичних термів показано на рис. 3.4.

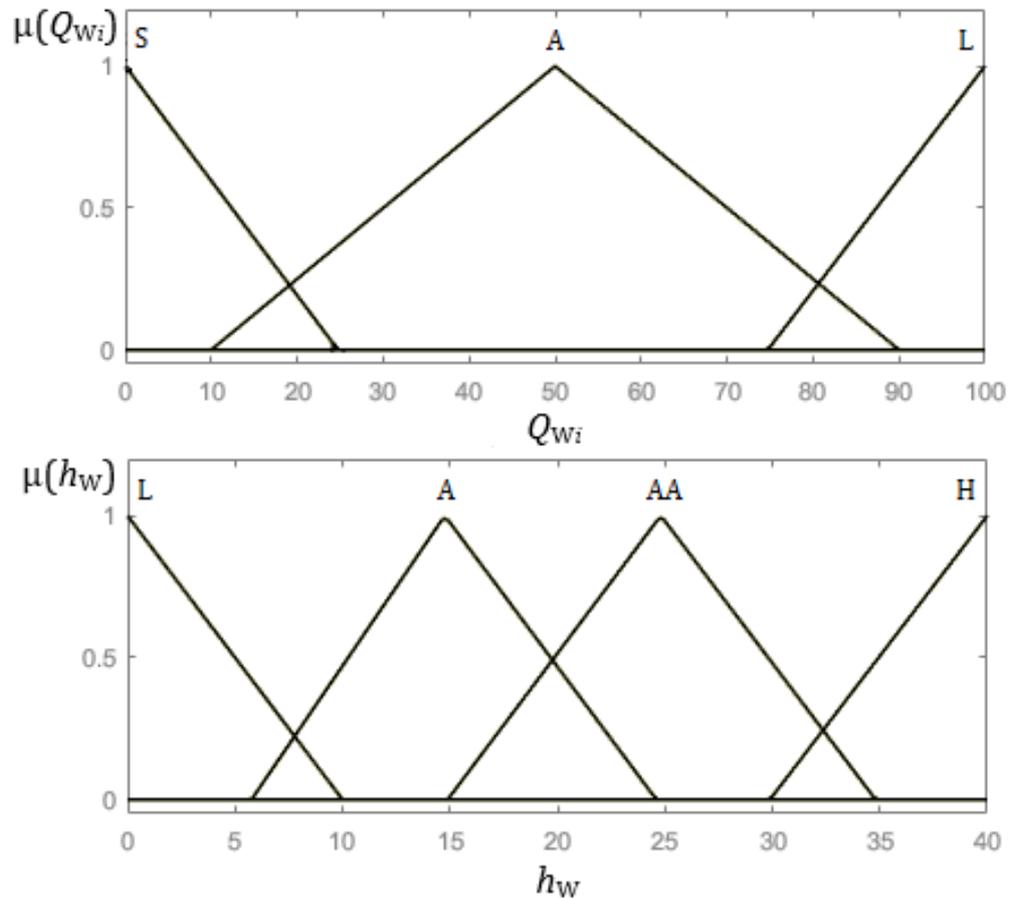


Рис. 3.4 Зовнішній вигляд лінгвістичних термів для вхідної змінної FSS ($i = 1, 2, 3, 4$) [14]

З урахуванням усіх можливих комбінацій, наведених лінгвістичних термів, максимальна кількість правил бази правил (RB) може дорівнювати 324. Проте, проаналізувавши всі фактичні умови роботи піролізної установки (з урахуванням умови (3.15) і той факт, що не всі види ТПВ можуть мати будь-який відсоток вологи), було встановлено, що кількість правил становить 31.

Загалом формі r -те правило цього RB представлено виразом:

$$\begin{aligned}
 &\text{IF } "Q_{W1} = A_{W1}" \text{ AND } "Q_{W2} = A_{W2}" \text{ AND } "Q_{W3} = A_{W3}" \\
 &\text{AND } "Q_{W4} = A_{W4}" \text{ AND } "h_w = A_1" \\
 &\text{THEN } "K_\alpha = K_{\alpha r}" \text{ AND } "T_S = T_{Sr}" ,
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

де A_{W1} , A_{W2} , A_{W3} , A_{W4} і A_1 є певними лінгвістичними термами вхідних змінних FSS; $K_{\alpha r}$ і T_{Sr} – певні значення вихідних змінних K_{α} і T_S для r -го правила ($r = 1, 2, \dots, 31$).

У свою чергу, розроблена база правил FSS (Fuzzy Support Software) представлена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

База правил FSS для визначення оптимальних параметрів процесу піролізу [14]

Номер правила	Q_{W1}	Q_{W2}	Q_{W3}	Q_{W4}	h_W	K_{α}	T_S
1	L	S	S	S	L	0.83	1053
2	S	L	S	S	L	0.77	738
3	S	L	S	S	A	0.81	703
4	S	L	S	S	AA	0.85	666
5	S	L	S	S	H	0.88	646
6	S	S	L	S	L	0.92	924
7	S	S	L	S	A	0.93	918
8	S	S	L	S	AA	0.96	906
9	S	S	L	S	H	0.97	904
10	S	S	S	L	L	0.9	728
11	A	A	S	S	L	0.8	900
12	A	A	S	S	A	0.82	880
13	A	A	S	S	AA	0.84	857
14	A	A	S	S	H	0.85	846
15	A	S	A	S	L	0.87	978
16	A	S	A	S	A	0.88	970
17	A	S	A	S	AA	0.88	964
18	A	S	A	S	H	0.89	956
19	A	S	S	A	L	0.86	883

Подовження таблиця 3.1

База правил FSS для визначення оптимальних параметрів процесу піролізу [14]

Номер правила	Q_{W1}	Q_{W2}	Q_{W3}	Q_{W4}	h_W	K_α	T_S
20	S	A	A	S	L	0.85	818
21	S	A	A	S	A	0.88	798
22	S	A	A	S	AA	0.91	777
23	S	A	A	S	H	0.92	770
24	S	A	S	A	L	0.84	720
25	S	A	S	A	A	0.86	707
26	S	A	S	A	AA	0.88	693
27	S	A	S	A	H	0.89	686
28	S	S	A	A	L	0.91	826
29	S	S	A	A	A	0.92	822
30	S	S	A	A	AA	0.93	815
31	S	S	A	A	H	0.94	812

Значення вихідних змінних K_α і T_S для кожного правила RB (табл. 3.1) визначаються в процесі оптимізації з використанням цільової функції (3.16) та математичної моделі процесу піролізу [111].

Крім того, для цієї нечіткої підсистеми операція «min» використовується як операція агрегації, а метод дискретного центру тяжіння використовується як метод дефазифікації, котрий є процедурою знаходження чіткого числового значення вихідного сигналу.

При обробці вхідних змінних: $Q_{W1} = 44\%$, $Q_{W2} = 47\%$, $Q_{W3} = 4\%$, $Q_{W4} = 5\%$, $h_W = 20\%$, в результаті дефазифікації отримали наступні значення вихідних змінних: $K_\alpha = 0,83$ $T_S = 869$ (рис.3.5).

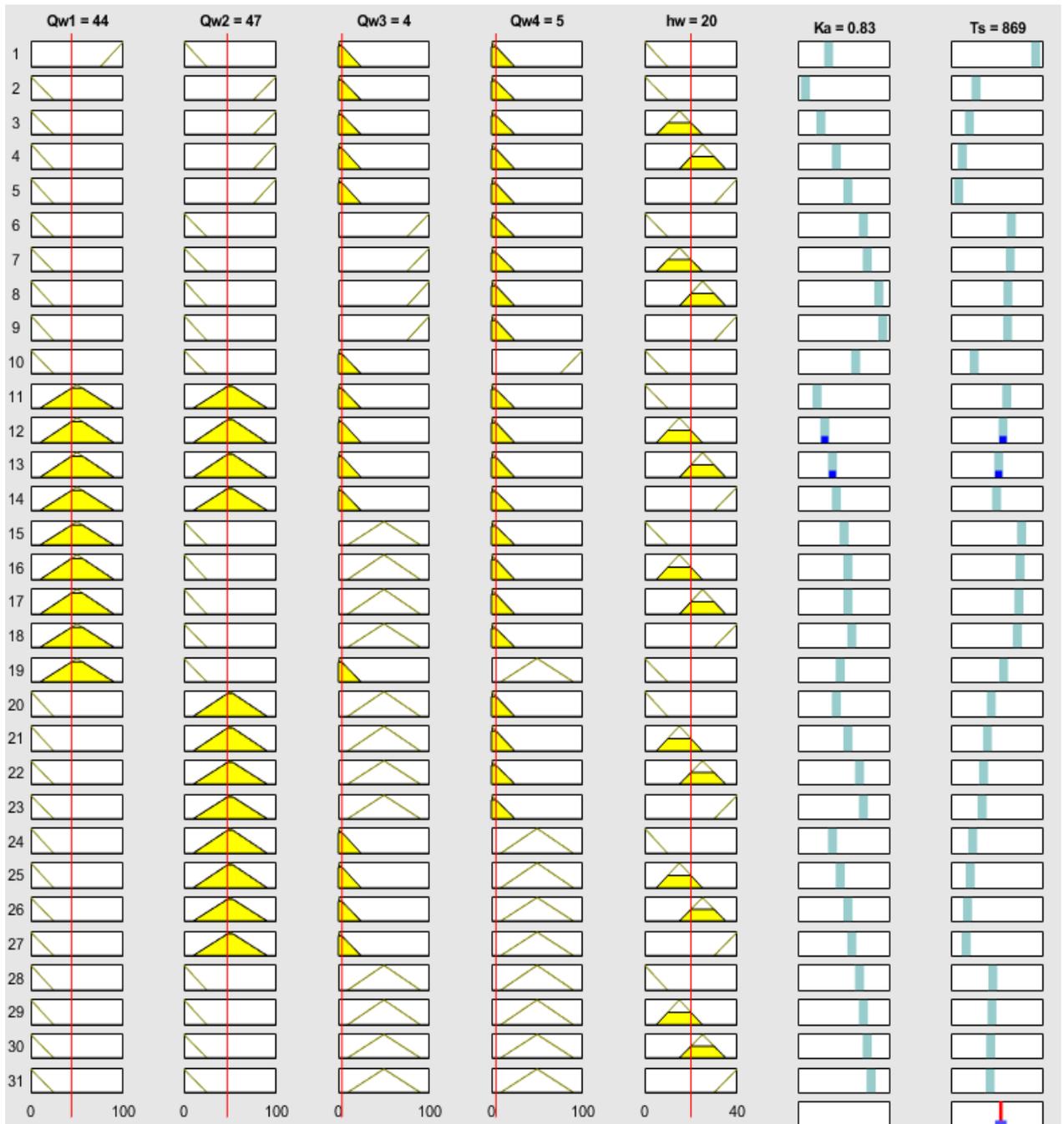


Рис. 3.5. Перевірка запрограмованих правил.

У наступному розділі проведено дослідження ефективності запропонованого методу нечіткого керування на конкретному прикладі, зокрема, при автоматизації установки піролізу ТПВ змінного складу з об'ємом реактора 250 л.

3.4 Ефективність методу нечіткого керування процесом піролізу ТПВ змінного складу

Досліджено ефективність запропонованого методу нечіткого керування при автоматизації піролізної установки з об'ємом реактора 250 л у перехідному режимі.

Заповнення газгольдера відбувається при виникненні різниці ΔQ_G між витратою спожитого піролізного газу, і поданими ТПВ, і повітрям. У свою чергу,

$$\Delta Q_G = G_1 + Q_1 - Q_4. \quad (3.20)$$

Для моделювання перехідних процесів заповнення газгольдера піролізної установки із заданим об'ємом доцільно використовувати передатну функцію [121]

$$W_{LG}(s) = \frac{L_R(s)}{\Delta Q_G(s)} = \frac{5e^{-3s}}{s(50s+1)}. \quad (3.21)$$

Для моделювання перехідних процесів зміни температури T і теплотворної здатності Q_i^r процесу піролізу для установки із заданим об'ємом доцільно використовувати такі передатні функції [121]:

$$W_{TR}(s) = \frac{T_R(s)}{T(s)} = \frac{e^{-3s}}{(50s+1)}; \quad (3.22)$$

$$W_{QR}(s) = \frac{Q_{iR}^r(s)}{Q_i^r(s)} = \frac{e^{-3s}}{(50s+1)}, \quad (3.23)$$

де T_R і Q_{iR}^r – реальні значення температури і теплотворної здатності в перехідному режимі; T і Q_i^r – значення температури і теплотворної здатності в стаціонарному режимі, розраховані за рівняннями (3.11) і (3.10) відповідно.

У даному випадку в якості регуляторів рівня (LC) і температури (TC) для системи управління піролізною установкою використовуються ПД-регулятори, які мають передатні функції:

$$W_{LC}(s) = \frac{u_{LC}(s)}{\varepsilon_L(s)} = k_{PL} + k_{DLS}; \quad (3.24)$$

$$W_{TC}(s) = \frac{u_{TC}(s)}{\varepsilon_T(s)} = k_{PT} + k_{DTS}, \quad (3.25)$$

де k_{PL} , k_{DL} , k_{PT} і k_{DT} – підсилення регуляторів, знайдені в процесі параметричної оптимізації, $k_{PL} = 48,8$; $k_{DL} = 43,4$; $k_{PT} = 0,015$; $k_{DT} = 0,054$.

Далі для розробленої системи керування на основі запропонованого методу та з використанням наведених передавальних функцій виконано комп'ютерне моделювання роботи піролізної установки для різного складу та вологості ТПВ.

На рис. 3.6 (а, б) наведено графіки перехідних процесів регулювання температури процесу піролізу та рівня в газгольдері для наступного складу ТПВ та вологості: $Q_{W1} = 44\%$, $Q_{W2} = 47\%$, $Q_{W3} = 4\%$, $Q_{W4} = 5\%$, $h_W = 20\%$.

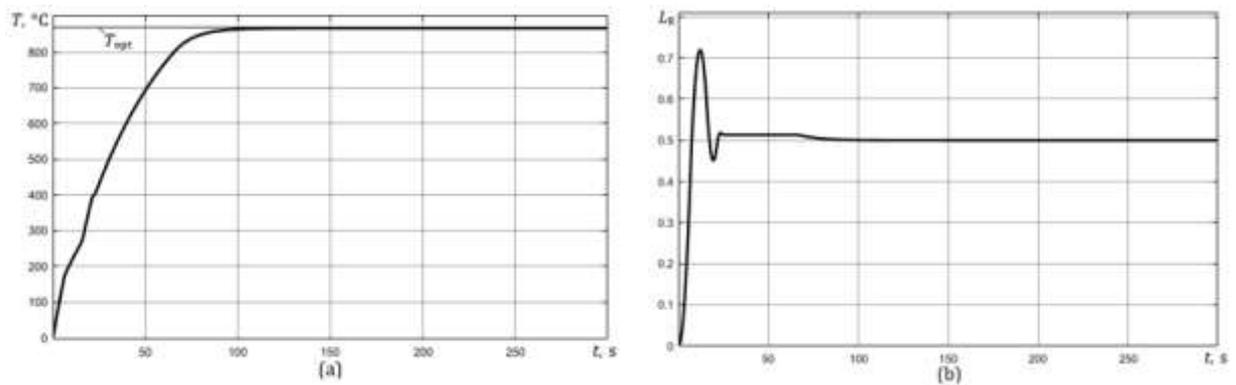


Рис. 3.6 Графіки перехідних процесів керування:

(а) температура; (б) рівня в газгольдері

($Q_{W1} = 44\%$, $Q_{W2} = 47\%$, $Q_{W3} = 4\%$, $Q_{W4} = 5\%$, $h_W = 20\%$)[14]

Також для цього складу на рис. 3.6 (а, б) представлені графіки перехідних процесів для зміни теплотворної здатності Q_i^r отриманого піролізного газу та цільової функції (3.16). При цьому за допомогою нечіткої підсистеми встановлено необхідне значення температури $T_S = 868$ °С, що є оптимальним для заданого складу та вологості відходів.

Задане значення рівня наповнення газгольдера L_{GS} встановлювалося у відносних одиницях як 0,5 максимального значення рівня.

Крім того, на рис. 3.7 теплотворна здатність Q_i^r отриманого піролізного газу наведена у відносних одиницях від максимального значення, що

відповідає даному складу ТПВ ($Q_i^r = 0,986$). Крім того, для заданого складу відходів і вологості оптимальне значення цільової функції J становить 1,224.

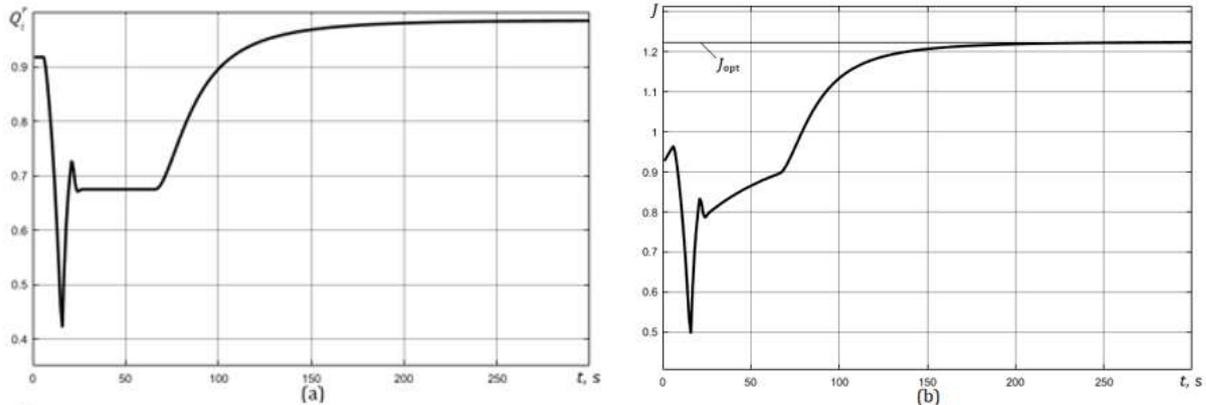


Рис. 3.7 Графіки перехідних процесів для зміни: (а) теплотворна здатність; (б) цільова функція (3.16)
($Q_{W1} = 44\%$, $Q_{W2} = 47\%$, $Q_{W3} = 4\%$, $Q_{W4} = 5\%$, $h_W = 20\%$)[14]

Далі були отримані аналогічні графіки перехідних процесів для зовсім іншого складу ТПВ і вологості: $Q_{W1} = 6\%$, $Q_{W2} = 45\%$, $Q_{W3} = 7\%$, $Q_{W4} = 42\%$, $h_W = 2,5\%$. У свою чергу, на рис. 3.7 (а, б) наведено графіки перехідних процесів регулювання температури T процесу піролізу та рівня L_R в газгольдері, на рис. 3.8 (а, б) – графіки перехідних процесів для зміни теплотворна здатність Q_i^r отриманого піролізного газу та цільова функція (3.16).

Для заданого складу ТПВ і вологості оптимальні значення температури T_S і цільової функції J складають $720\text{ }^\circ\text{C}$ і 1,238 відповідно. До того ж теплотворна здатність Q_i^r отриманого піролізного газу дорівнює 0,99 ($Q_i^r = 0,99$).

Як видно з рис. 3.6-3.9, розроблена система дозволяє ефективно керувати піролізною установкою в умовах змінного складу відходів і вологості. При цьому успішно вирішуються всі завдання автоматичного контролю, поставлені в підрозділі 3.1.1.

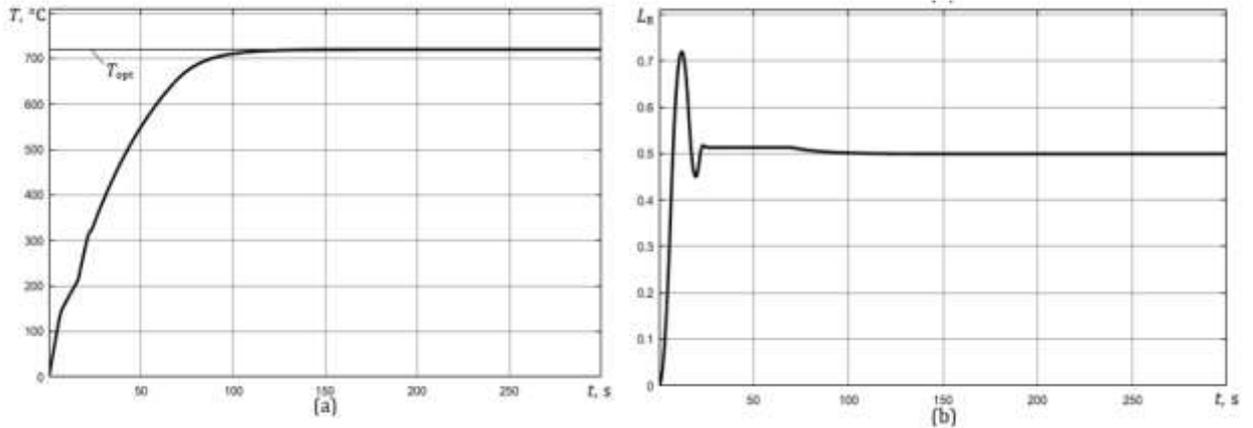


Рис. 3.8 Графіки перехідних процесів управління: (а) температура;
(б) рівня в газгольдері
($Q_{W1} = 6\%$, $Q_{W2} = 45\%$, $Q_{W3} = 7\%$, $Q_{W4} = 42\%$, $h_W = 2,5\%$.)[14]

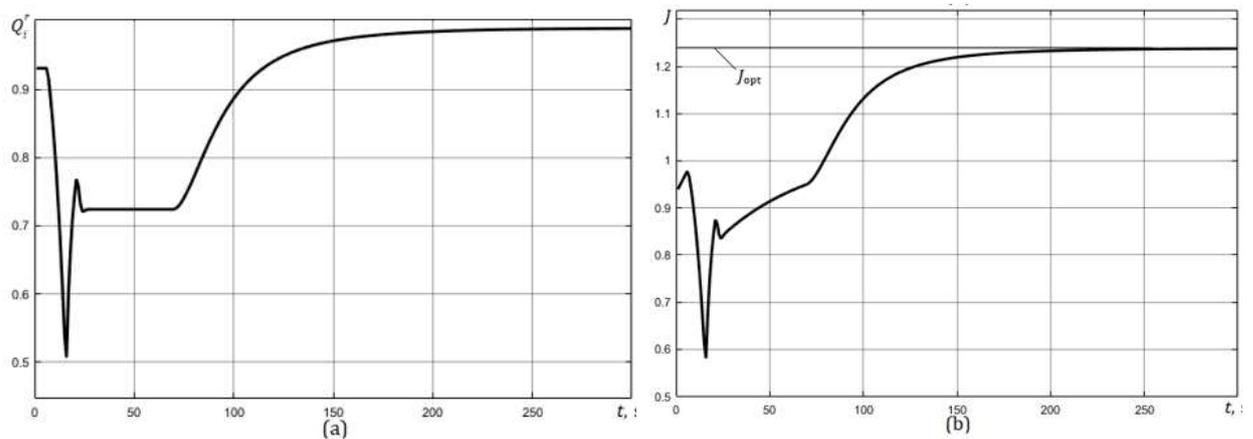


Рис. 3.9. Графіки перехідних процесів для зміни: (а) теплотворна
здатність; (б) цільова функція (3.16)
($Q_{W1} = 6\%$, $Q_{W2} = 45\%$, $Q_{W3} = 7\%$, $Q_{W4} = 42\%$, $h_W = 2,5\%$.)[14]

Виробництво необхідної кількості піролізного газу з оптимальним значенням теплотворної здатності Q_i^r забезпечується за рахунок ефективного регулювання коефіцієнта K_α , що визначає подачу ТПВ і витрату повітря. Також здійснюється стабілізація необхідного значення рівня в газгольдері та оптимального значення температури, яке відповідає певному складу та вологості вхідних відходів. При контролі цих взаємопов'язаних змінних (T і L_G) забезпечуються достатньо високі показники якості. Зокрема, нульове перерегулювання та статична помилка при досить короткому часі регулювання температури процесу піролізу ($t_r = 81$ с для 1 випадку; $t_r = 92$ с

для 2 випадку). Крім того, максимальне перевищення 44% і нульова статична похибка з достатньо коротким часом регулювання ($t_r = 69$ с для 1 випадку; $t_r = 73$ с для 2 випадку) для контролю рівня газгольдера.

У цих двох розглянутих випадках склад ТПВ і вологість були встановлені до запуску установки піролізу і не змінювалися в процесі її експлуатації. Для більш детального вивчення розробленої системи та запропонованого методу нечіткого керування розглянемо далі випадок, коли склад і вологість вхідних відходів змінювалися під час роботи установки. На рис. 3.10 (а, б) наведено графіки перехідних процесів регулювання температури процесу піролізу та рівня в газгольдері.

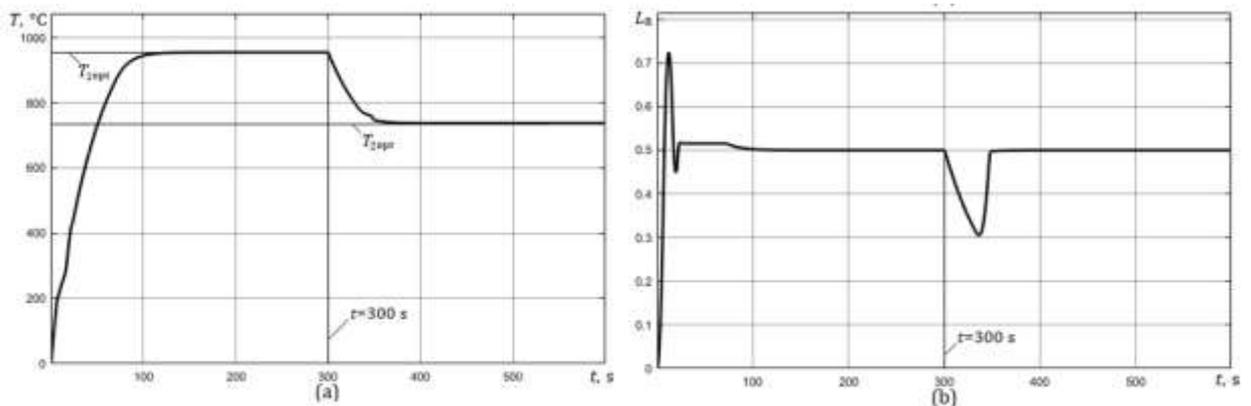


Рис.3.10 . Графіки перехідних процесів керування:
 (а) температура; (б) рівня в газгольдері
 (Зміна складу ТПВ та вологості під час роботи установки)[14]

У свою чергу, ці графіки отримані при дослідженні випадку зміни складу вхідних ТПВ під час роботи установки.

Також на рис. 3.11 (а, б) представлені графіки перехідних процесів зміни теплотворної здатності Q_i^r отриманого піролізного газу та цільової функції (3.16) для цього випадку.

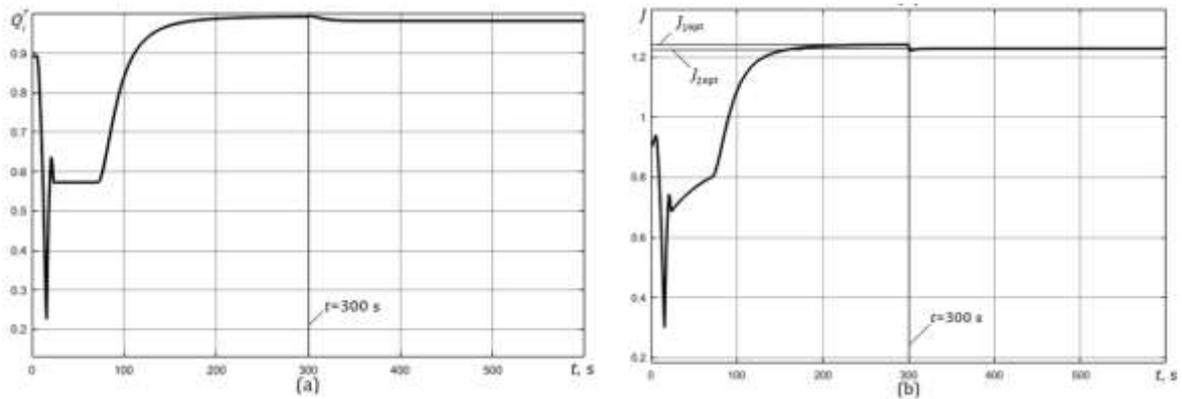


Рис. 3.11 Графіки перехідних процесів для зміни:
 (а) теплотворна здатність; (б) цільова функція (3.16)
 (Зміна складу ТПВ та вологості під час роботи установки)[14]

Спочатку, до запуску заводу, склад і вологість ТПВ були такими: $Q_{W1} = 45\%$, $Q_{W2} = 7\%$, $Q_{W3} = 46\%$, $Q_{W4} = 2\%$, $h_W = 35\%$. Для заданого складу та вологості оптимальні значення температури T_{1opt} та цільової функції J_{1opt} становлять $956\text{ }^\circ\text{C}$ та $1,242$ відповідно.

Тоді під час роботи піролізної установки в момент часу $t = 300$ с склад і вологість відходів змінювалися наступним чином: $Q_{W1} = 5\%$, $Q_{W2} = 90\%$, $Q_{W3} = 3\%$, $Q_{W4} = 2\%$, $h_W = 0,5\%$. При цьому оптимальні значення температури T_{2opt} і цільової функції J_{2opt} становлять $738\text{ }^\circ\text{C}$ і $1,228$ відповідно для заданого складу ТПВ і вологості.

Отримані результати комп'ютерного моделювання у вигляді графіків перехідних процесів (рис. 3.10, 3.11) показують, що система також дозволяє досить ефективно контролювати процес піролізу зі змінами складу та вологості відходів під час роботи установки. При цьому в момент часу $t = 300$ с при зміні складу і вологості значення рівня відхилилося не більше ніж на 40% протягом 48 с. Водночас для каналу регулювання температури в момент зміни складу ТПВ та вологості ($t = 300$ с) перехідний процес був аперіодичним з часом регулювання 48 с.

Таким чином, отримані результати підтверджують високу ефективність запропонованого методу нечіткого керування та доцільність його

застосування для розробки систем автоматизованого керування різними піролізними установками, що працюють в умовах зміни складу та вологості вхідних відходів.

3.5 Висновки до розділу

1. Розглянуто особливості роботи та основні завдання керування узагальненою піролізною установкою, яка використовується для термічної утилізації ТПВ.

2. Розроблено метод нечіткого керування процесом піролізу твердих побутових відходів змінного складу та вологості, який забезпечує правильне автоматизоване керування піролізною установкою з визначенням оптимального співвідношення витрати повітря/ТПВ, що дозволяє забезпечити ефективність процесу термічної деструкції та вирішувати завдання стабілізації таких взаємопов'язаних керованих параметрів процесу, як температура піролізу та значення рівня в газгольдері в перехідних режимах.

3. Розроблено структуру АСК піролізною установкою для реалізації запропонованого методу нечіткого керування.

4. Розроблено нечітку підсистему визначення оптимальних параметрів процесу піролізу. Оскільки склад відходів можна визначити тільки приблизно, то для апроксимації попередніх розрахункових даних була використана нечітка підсистема типу Такагі-Сугено, яка має п'ять вхідних змінних-відсотковий вміст типів суміші, вологість ТПВ і дві вихідні змінні: (K_α ; T_S). Питомий коефіцієнт K_α визначається таким чином, щоб забезпечити максимально можливе значення теплотворної здатності одержуваного піролізного газу та найбільшу температуру T_S в реакторі для інтенсифікації процесу піролізу в режимі реального часу.

5. Досліджено ефективність методу нечіткого керування процесом піролізу ТПВ змінного складу, для оцінки якого проведено розробку системи нечіткого керування установкою піролізу ТПВ з об'ємом реактора 250 л.

Зокрема, для детального дослідження виконано комп'ютерне моделювання роботи піролізної установки для 4 різних складів та вологості ТПВ: 1) $Q_{W1} = 44\%$, $Q_{W2} = 47\%$, $Q_{W3} = 4\%$, $Q_{W4} = 5\%$, $h_W = 20\%$; 2) $Q_{W1} = 6\%$, $Q_{W2} = 45\%$, $Q_{W3} = 7\%$, $Q_{W4} = 42\%$, $h_W = 2,5\%$; 3) $Q_{W1} = 45\%$, $Q_{W2} = 7\%$, $Q_{W3} = 46\%$, $Q_{W4} = 2\%$, $h_W = 35\%$; 4) $Q_{W1} = 5\%$, $Q_{W2} = 90\%$, $Q_{W3} = 3\%$, $Q_{W4} = 2\%$, $h_W = 0,5\%$. Крім того, досліджено випадок, коли склад та вологість вхідних відходів змінювалися під час роботи установки. Отримані результати комп'ютерного моделювання підтверджують високу ефективність розробленої системи та методу нечіткого керування, що дозволяє вирішити всі чотири завдання автоматизованого керування піролізною установкою в умовах змінного складу ТПВ та вологості. А саме: виробництво необхідної кількості піролізного газу з оптимальним значенням теплотворної здатності забезпечується за рахунок ефективного нечіткого керування коефіцієнтом K_α , що визначає витрату ТПВ та повітря. Стабілізація оптимального значення температури, що відповідає певному складу та вологості вхідних ТПВ, та необхідне значення рівня в газгольдері здійснюється з досить високими якісними показниками.

РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ АСК ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ БАРАБАННОГО КОТЛА ПРИ СПАЛЮВАННІ ТПВ

Метою розділу є розробка та дослідження АСК тепловою потужністю спалювальної установки з компенсацією збурень навантаження та зміни складу палива на будь-якому рівні теплової потужності та збільшення ефективності процесу спалювання ТПВ незалежно від їхнього складу та поточного рівня потужності.

Для розв'язання поставленої задачі необхідно:

- обґрунтувати структуру устаткування, що експлуатується при зміні складу палива у вигляді ТПВ;
- провести аналіз існуючих методів керування навантаженням парових котлів при збуреннях складом палива у вигляді ТПВ;
- сформулювати завдання керування навантаженням парогенеруючого устаткування;
- удосконалити математичну модель спалювання ТПВ змінного складу в топці з циркулюючим киплячим шаром (ЦКШ). При цьому модель розбити на такі ділянки: модель процесу горіння ТПВ в псевдо-рідинному шарі; модель передачі тепла робочому тілу в поверхнях нагріву; модель викидів шкідливих речовин, насамперед оксидів сірки;
- розробити імітаційну модель АСК тепловою потужністю котла та дослідити методи керування топками з ЦКШ
- провести обчислювальний експеримент розробленої АСК та визначити показники якості керування.

Реалізація поставлених завдань дозволить розробити та дослідити АСК тепловим навантаженням барабанних котлів, призначених для спалювання ТПВ, підвищити ефективність процесу термічної деструкції та компенсувати обурення зміни навантаження та складу палива у вигляді ТПВ.

Вдосконалена математична модель динаміки барабанних котлів дозволить виконати математичне моделювання роботи вдосконаленої системи керування.

4.1 Обґрунтування структури устаткування, що експлуатується при зміні складу ТПВ

Енерготехнологічні установки, які використовують ТПВ як основне паливо, є одним із найбільш доступних та економічно вигідних відновлюваних джерел енергії. Сьогодні у Європі завдяки термічній утилізації відходів щорічно виробляється понад 28 млрд кВт/год електроенергії та близько 70 млрд кВт·год теплової енергії. У США загальна електрична потужність таких установок становить 2700 МВт [125,126]. Крім енергетичного потенціалу, ці технології допомагають вирішувати важливі соціальні проблеми, такі як очищення великих міст від надлишкових відходів.

Основним методом термічної деструкції ТПВ є пряме спалювання, хоча активно застосовуються й інші технології, зокрема газифікація, піроліз, спалювання в шлаковому розплаві, а також новітні підходи з використанням плазмотронів. Ці методи не лише ефективно забезпечують отримання енергії, але й відповідають екологічним стандартам сучасності. Котельні установки, які працюють із паливом у вигляді ТПВ, мають свої технічні особливості. Вони потребують спалювання відходів із великим надлишком повітря ($\alpha \sim 1.8$), що пов'язано з великою варіативністю теплоти згоряння і складу ТПВ. Для деструкції поліхлорованих дібензодіоксинів і фуранів (ПХДД/ПХДФ), необхідно підтримувати температуру продуктів згоряння вище 850°C протягом не менше двох секунд. Температура димових газів на вході до конвективних поверхонь обмежується 750°C, щоб уникнути утворення шлаку, а на виході з котла вона має залишатися в межах 180–200°C для забезпечення оптимальної роботи систем газоочищення [127]. Багатоступеневі системи очищення газів є обов'язковими для таких установок і значно мінімізують викиди шкідливих речовин.

Особливої уваги заслуговують печі з ЦКШ, які використовуються для термічної деструкції ТПВ. У таких установках матеріал переходить у завислий стан під впливом потоку повітря, що проходить через шар дрібнодисперсного сипкого матеріалу. Це створює умови для інтенсивного теплообміну між частинками та газом. Рух частинок у киплячому шарі нагадує бульбашки у киплячій рідині, що значно підвищує ефективність процесу. Теплопередача в такому середовищі в чотири рази перевищує показники нерухомого шару, що робить цю технологію надзвичайно ефективною для сучасних енерготехнологічних установок.

На рис. 4.1 показано принципову схему печі з ЦКШ [18]. Вертикальний корпус печі 3, футерований вогнетривкою цеглою, має внизу газорозподільну решітку 8 провального або безпровального типу. У процесі роботи печі під решітку подається псевдозріджувальний газ, зазвичай повітря. Повітря приводить у завислий стан зернисте завантаження, яке розподіляється на щільну фазу шару 1 і розбавлену фазу 2.

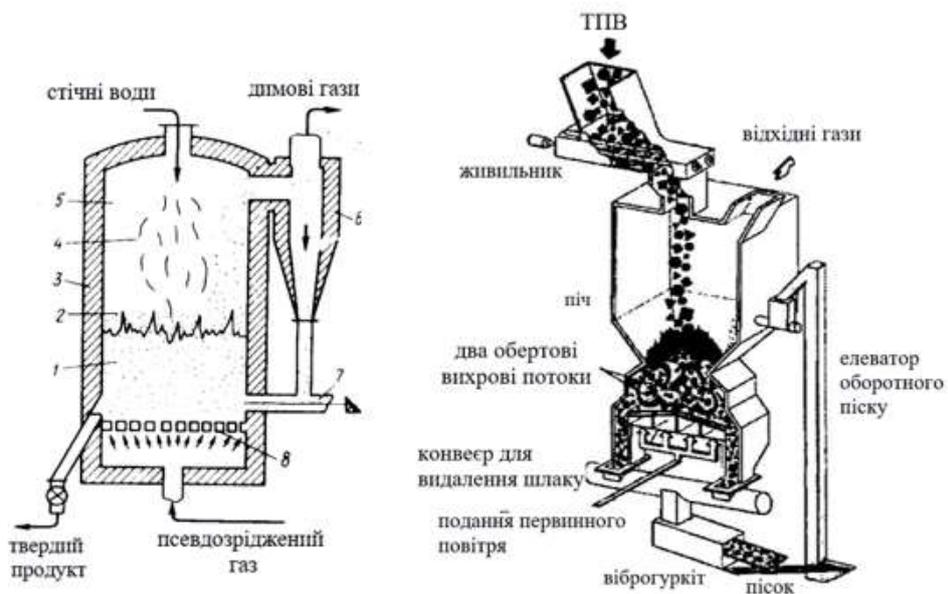


Рисунок 4.1. Схема роботи печі з ЦКШ:

- 1 - щільна фаза зрідженого шару; 2 - розбавлена фаза зрідженого шару;
 3 - піч; 4 - розпоршений завантажений матеріал; 5 – камера (топка); 6 -
 циклонний сепаратор; 7 - труба для повернення матеріалів; 8 -
 газорозподільна решітка [18].

У нижній частині топки 5, у якій відбувається основне горіння ТПВ, завдяки відповідній подачі повітря, форми решітки 8 та конструкції топки формуються парні вихрові зони - так званий вихровий киплячий шар.

Зверху на завантаження через форсунки або дозатори подаються відходи. Розмір частинок подрібнених відходів повинна бути до 20 мм. Оптимальним розміром вважається розмір частинок 2-3 мм. Наявність великих частинок або злиплих агломератів шламу створює умови для часткового горіння ТПВ, наприклад нафтовідходів усередині шару, оскільки вони тонуть у шарі.

Димові гази, що містять мінеральні механічні домішки, очищаються в циклоні 6. Для видалення шлаку використовують контур зовнішньої циркуляції матеріалу шару, що складається з водоохолоджуваних шнеків вивантаження 7, вібросита, з якого крупна зола шару (шлак) відводиться з установки, а дрібна зола за допомогою горизонтального шнека та елеватора надходить до перепускного бункера та повертається в топку.

До складу установки по спалюванню ТПВ, загальною продуктивністю 250 тис. тон ТПВ на рік, на прикладі якої досліджувалася технологія керування процесом термічної деструкції ТПВ, входять три енерготехнологічні установки, де ТПВ спалюють у вихровому киплячому шарі, і дві турбіни електричною потужністю 6 МВт [18, 128].

Кожна енерготехнологічна установка, крім топки, містить у собі розташовані за нею послідовно за ходом газів котел-утилізатор, циклон, абсорбер, у якому розпилюють вапняне молоко, вузол подачі реагентів для вловлювання ПХДД/ПХДФ та ртуті, рукавний фільтр і димосос (рис. 4.2).

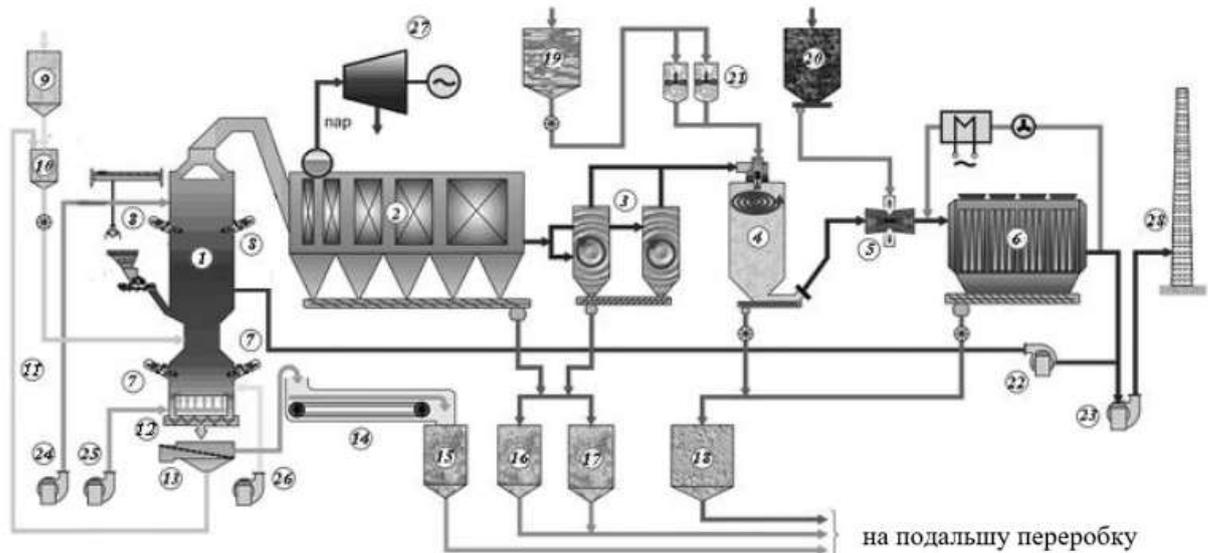


Рисунок 4.2. Схема енергетичної утилізації ТПВ: 1 - топка з киплячим шаром; 2 - котел-утилізатор; 3 - циклон; 4 - розпилювальний абсорбер; 5 - вузол подачі реагентів; 6 - рукавний фільтр; 7, 8 - газові пальники; 9 - бункер піску; 10 - перепускний бункер; 11 - елеватор; 12 - шнеки вивантаження; 13 - вібросито; 14 - шлаковий транспортер; 15... 18 - бункери твердих залишків; 19, 20 - бункери реагентів; 21 - резервуар для приготування вапняного молока; 22 - димосос рециркуляції газів; 23 - димосос; 24...26 - вентилятори повітря; 27 - турбоагрегат; 28 - димова труба [18]

Під час спалювання відходів у вихровому киплячому шарі важливо уникати технологічних порушень, оскільки навіть незначні відхилення у процесі можуть мати серйозні наслідки для роботи енерготехнологічної установки. Особливу увагу приділяють правильному розподілу первинного охолоджувального повітря, що подається під решітку, а також стабільній роботі зовнішнього контуру циркуляції матеріалу шару. Важливо підтримувати температуру киплячого шару в допустимих межах, адже відхилення, як у бік зниження, так і в бік підвищення, можуть призвести до критичних наслідків. Додаткову небезпеку становить потрапляння до шару великих сторонніх предметів, насамперед металевих фрагментів, які здатні накопичуватися та викликати порушення процесу.

Основною проблемою таких відхилень є шлакування шару, що спричиняє тривалі зупинки енергетичних установок. Температурний режим у

зоні киплячого шару є вирішальним фактором, від якого залежить стабільність процесу. За температури вище 700°C значно зростає ризик шлакоутворення і відкладень на стінах топки, тоді як зниження температури до 550°C і нижче призводить до неповного згоряння компонентів відходів. У такому випадку у топці накопичуються незгорілі відходи, що створює додаткові ускладнення і вимагає оперативного втручання.

Для ефективного регулювання температури використовують різноманітні методи. Серед них – спалювання додаткового палива у пальниках, розташованих у зоні киплячого шару, що часто застосовуються для розпалювання (див. поз. 7, рис. 4.2). Також використовують упорскування води, зміну витрати та перерозподіл повітря, що подається під решітку. Ці методи дають змогу утримувати температуру в межах, які забезпечують оптимальні умови для повного згоряння відходів і запобігають утворенню шлаків.

4.2. Аналіз методів керування навантаженням парових котлів при збуреннях складом ТПВ

Проблеми оптимального спалювання ТПВ завжди приділялася велика увага. Система контролю горіння є однією з основних систем керування піччю або котлом. За час експлуатації котельного обладнання розроблено велику кількість схем керування різними видами палива (твердим, рідким і газоподібним), які вже стали стандартними [17, 19, 20], [22-26]. Однак при розробці обладнання та АСК до нього передбачається, що в процесі експлуатації склад палива буде змінюватися в невеликому, заздалегідь заданому діапазоні.

Класичні методи регулювання теплового навантаження розглянуто в [129,130]. У розглянутій АСК завданням управління є підтримка заданого тиску перегрітої пари в режимі керування або заданої витрати перегрітої пари під час роботи котла в базовому режимі. Такі системи автоматичного керування, як правило, реалізуються у двох модифікаціях - із сигналом

витрати палива, коли до пальникових пристроїв подається рідке або газоподібне паливо з постійною теплотворною здатністю, і з сигналом виділення тепла в камеру згорання, коли якісний склад рідкого або газоподібного палива непостійний.

У першому способі (з сигналом споживання палива) завдання реалізується лише тоді, коли котел працює в усталеному режимі, а регулювання може бути забезпечено, коли збурення застосовуються в межах діапазону регулювання. При значній зміні навантаження котла або зміні теплотворної здатності палива необхідно переналаштувати завдання на регулятор навантаження (тиску пари). При зменшенні навантаження теплові потоки перерозподіляються в об'ємі топки й газоходів, що призводить до невизначеного зниження ККД. Тому даний спосіб регулювання теплової потужності в котлах не використовується при спалюванні вуглеводневого палива випадкового складу, який змінюється в часі [129].

Зміна теплотворної здатності характерна для твердого палива. Тому на енергетичних котлах, що працюють на твердому паливі, використовуються навантаження АСК з сигналом «тепло» [130]. Одним з інформаційних сигналів в такій АСК є швидкість зміни тиску в барабані котла. Тому використання таких АСК для водогрійних котлів, що працюють на газоподібному паливі, утруднено через незмінність тиску води в котлі.

Не дивлячись на довгу історію експлуатації великої кількості парових котлів, дослідження та вдосконалення систем керування ними тривають. Особливу увагу приділяють регулюванню навантаження [131,132].

У роботах [119],[133-136] узагальнені методи розрахунку складу продуктів згорання, що дозволяє змодельовати майже всі органічні сполуки, які горять у повітряній атмосфері. Це дозволяє, незважаючи на велике розмаїття горючих речовин, описати процес утворення продуктів згорання і визначення їхньої температури за допомогою єдиної моделі.

У роботі [137] розглянуто АСК теплового навантаження барабанного котла з випадковою зміною витрати доменного й коксового газів і керуючим

впливом лише на витрату природного газу. Передбачається використання компенсатора основного збурення – витрати доменного газу. Наведено результати імітаційного моделювання за дії випадкових збурень витрати доменного газу. У цій же статті описано спосіб регулювання теплового навантаження барабанного котла для спалювання горючих штучних газів. Для вдосконалення системи регулювання теплового навантаження за допомогою теплового сигналу, використовуючи штучний газ як паливо для збільшення пропускної здатності регулюючого елемента, використовується компресор, який за рахунок збільшення тиску газу перед повністю відкритим регулюючим елементом збільшує масу потоку й таким чином компенсує низьку щільність вуглеводневого газу і (або) теплотворну здатність.

Наведено АСК теплового навантаження барабанного котла при спільно-роздільному спалюванні доменного, коксового та природного газів із випадковою зміною їхніх витрати [138]. Для підвищення ефективності АСК пропонується крім типової АСК за допомогою «теплового» сигналу впровадити пристрої для компенсації випадкових збурень витрат цих газів. Наведено результати дослідження комбінованої системи та показано її ефективність при різних режимах роботи котла.

З проведеного огляду джерел інформації можна зробити наступні висновки:

- спалення ТПВ у сміття-спалюваних установках практикується доволі активно та достатньо довго;
- одним зі способів спалення є використання топок з ЦКШ;
- керування котлами, які спалюють ТПВ, виконується за традиційною схемою керування, яка використовується для спалення твердого палива (вугілля);
- коливання складу ТПВ, які викликають зміну теплотворної здатності та кількості повітря, що подається на спалювання, не компенсуються. Процес проводиться з великим надлишком повітря для запобігання утворенню шкідливих викидів;

– існують системи керування, які здатні компенсувати коливання складу ТПВ, але вони використовуються при спаленні газоподібних сумішей.

4.3. Постановка задачі керування навантаженням парогенеруючого устаткування

Об'єктом керування є установка спалення ТПВ[18] з метою отримання теплової енергії у вигляді перегрітої пари або гарячої води. Структурна схема регульованого апарату наведена на рисунку 4.3.

Технологічний процес полягає в наступному. Подрібнені ТПВ (паливна суміш) з бункеру 1, за допомогою транспортеру 5 подається в топку 8. У топці розташований киплячий шар, який складається з паливної суміші, інерту (піску, вапняку, тощо). Завдяки робочій температурі шару паливна суміш осушується, підігрівається та спалюється. Також у топці розташовані радіаційні поверхні нагріву, які сприймають випромінювання від матеріалів, що спалюються. Димові гази відводяться через циклон та газохід у котел-утилізатор з розвиненими конвективними поверхнями нагріву (пароперегрівач 12, економайзер 11, повітрянагрівач 10).

Через особливості конструкції топки з ЦКШ доволі велика частина шихти (суміш інерту та золи) виноситься з об'єму топки. Тому після топки встановлений циклон, що уловлює та повертає назад частини шару. Крім того через подову частину топки відводиться частина шихти, яка або видаляється на золовідвал, або направляється у винесений теплообмінник 9. У ньому шихта охолоджується до необхідної температури і знов подається до топки.

Для зв'язування сполук сірки (оксидів та діоксидів) та хлору (зазвичай випарів соляної кислоти) у топку додаються вапно та сода (пристрій 3).

Для створення киплячого шару в нижню частину топки, під розподільчу решітку 18, підводиться повітря 15. Це повітря називається первинним. Частина повітря 21 підводиться над шаром і служить для повного окиснення горючих сполук паливної суміші. Це повітря називається вторинним.

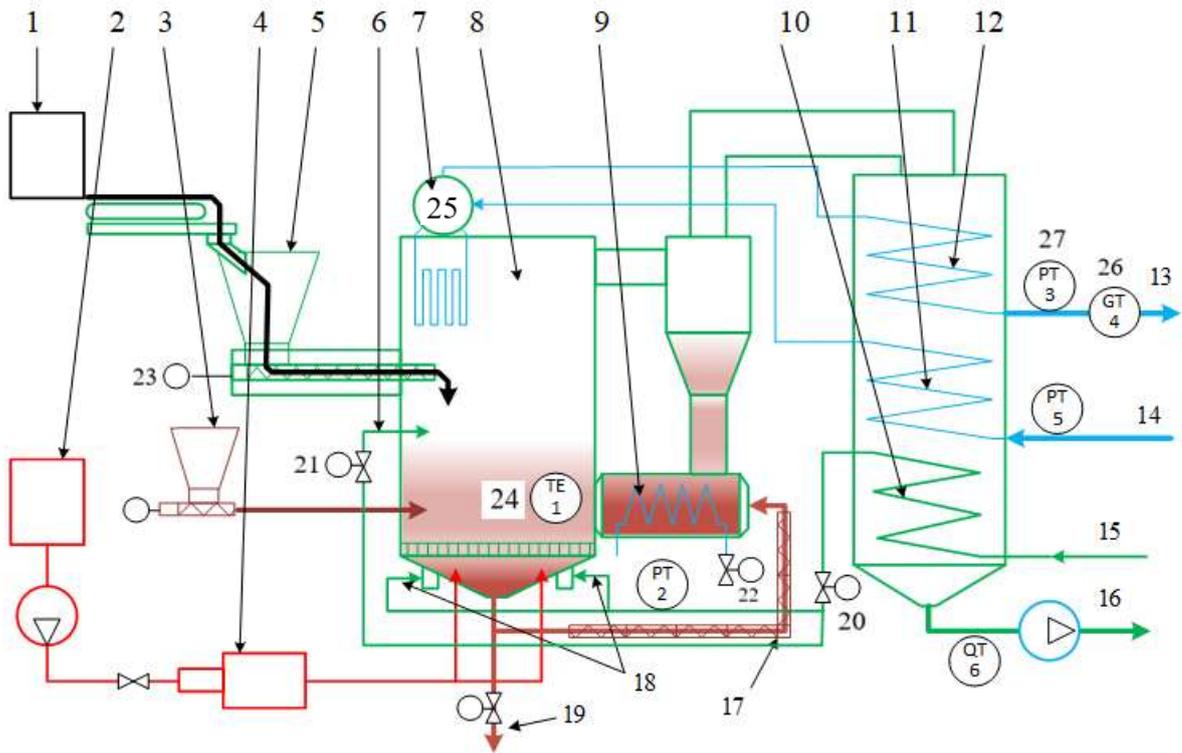


Рисунок 4.3. Структурна схема регульованого апарату

1 – бункер ТПВ, 2 – ємність палива для розпалення, 3 – бункер вапняку, 4 – камера згоряння, 5 - горловина завантаження паливної суміші, 6 – подача вторинного повітря, 7 – барабан котла, 8 – топка котла, 9 – поверхня нагріву для регулювання температури шихти, 10 – поверхня теплообміну котла для нагріву повітря, 11 – економайзер, 12 – пароперегрівач, 13 – вихід пари, 14 – вхід води, 15 – вхід повітря, 16 – вихід димових газів, 17 – лінія рециркуляції шихти, 18 – подача первинного повітря, 19 – відведення шихти (золи); 20 – регулюючий орган подачі первинного повітря для розрідження шару; 21 – регулюючий орган подачі вторинного повітря ; 22 – живильник рециркуляції шихти; 23 – вимірювальний перетворювач витрати паливної суміші; 24 – вимірювальний перетворювач рівня псевдо-рідинного шару; 25 – вимірювальний перетворювач тиску в барабані котла, 26 – вимірювальний перетворювач витрати теплоносія, що нагрівається в котлі; 27 – вимірювальний перетворювач тиску пари теплоносія [18]

Підготовлена вода 14 подається до котла, проходить скрізь економайзер 11 і потрапляє в барабан 7. Завдяки радіаційним поверхням нагріву вода перетворюється на пару. Пара далі перегрівається у пароперегрівачі 12.

Зазвичай для спалення ТПВ використовуються парові котли малої або середньої потужності. Тому водяна пара, у якості теплоносія, використовується волога або трохи перегріта. Відповідно до цього використовується регулятор навантаження.

У якості керуючих впливів застосовуються продуктивність відповідних живильників та вентиляторів.

Особливістю роботи таких сміттєспалювальних установок є різко змінний склад побутових відходів, що подаються на переробку. Також особливою відмінністю спалювання ТПВ є ризик утворення шкідливих сполук, таких як діоксиди сірки, оксиди азоту, сполуки хлору, діоксини й фурані. Для запобігання утворення таких сполук дуже важливо підтримувати температуру киплячого шару.

Для підвищення точності підтримання технологічних параметрів пропонується доповнити штатні системи регулювання пристроєм визначення бруutto-формули паливної суміші.

Таким чином метою роботи є розробка та дослідження АСК тепловою потужністю сміттєспалювальної установки з компенсацією збурень навантаження та зміни складу палива у вигляді ТПВ шляхом визначення складу паливної суміші методом визначення її бруutto-формули для забезпечення необхідних параметрів технологічного процесу.

4.4. Математична модель спалювання ТПВ змінного складу в топці з ЦКШ

Для досягнення поставленої мети необхідно вдосконалити математичні моделі спалювання твердого палива у вигляді ТПВ змінного складу в топках з ЦКШ з урахуванням наявності в суміші, що спалюється, органічних сполук, що містять сірку і хлор[21, 24, 25, 26].

Математичну модель було розділено на наступні ділянки:

- модель процесу горіння твердого палива у вигляді ТПВ в псевдо-рідинному шарі;
- модель передачі тепла робочому тілу в конвективних поверхнях нагріву;
- модель викидів шкідливих речовин, насамперед оксидів сірки.

4.4.1. Математична модель процесу горіння твердого палива у вигляді ТПВ в псевдо-рідинному шарі

У разі розгляду топки як об'єкта автоматизації насамперед викликають інтерес динамічні властивості системи, які далі використовуються для керування.

Зробимо синтез динамічної моделі котлоагрегату шахтної котельної установки з топкою з ЦКШ, з огляду на те, що як паливо використовується ТПВ, а масові та енергетичні складові враховуємо на одиницю часу.

У топку з ЦКШ тепло надходить від двох джерел:

- у результаті згоряння твердого палива у вигляді ТПВ, що закидаються в топку Q_L^F ;
- вноситься разом із підігрітим дуттєвим повітрям Q_{air}^F .

За традиційним підходом до розгляду динамічні властивості топки оцінюють за допомогою рівняння теплового балансу, яке наведено в [139]. До рівняння входить теплоємність матеріалу шару та повітря, густина матеріалу шару та густина повітря, площа дзеркала горіння, висота шару, температура шару та газу, теплота згоряння паливної суміші, масова витрата паливної суміші, швидкість потоку повітря через шар, частинки хімічного та механічного недопалу й втрати теплоти, що відводиться із золою та випромінюванням.

Однак такий підхід має недоліки. Перший – величини теплоємності при змінах температури в межах існування шару є константами, отже, має сенс замість теплоємностей користуватися питомими ентальпіями. Другий –

витрата теплоти під час прогрівання твердого палива не враховується. Третій – при визначені теплоти, що виноситься з шару сумішшю газів, не враховується хімічний склад суміші, що надходить у шар і що виходить із шару. Четвертий – при зміні витрати пального не враховується, що миттєве значення теплоти, отримане від згоряння, істотно залежить від його гранулометричного складу.

Для подальшого моделювання буде запозичено розроблено структуру математичної моделі топкового простору на основі методу декомпозиції [24, 139] , що наведена на рис. 4.4.

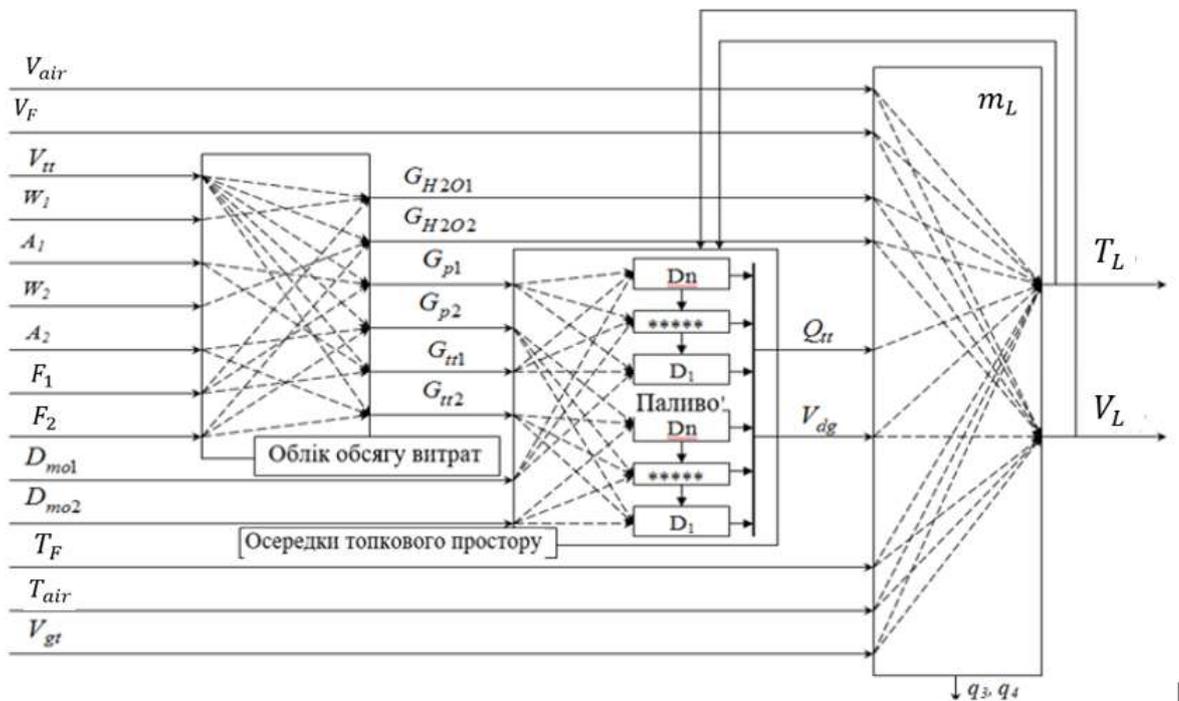


Рисунок 4.4. Структура моделі топкового простору [24, 139]

Об'ємна витрата твердої паливної суміші V_F з урахуванням поточних значень зольності A , вологості W і частки горючих органічних сполук різних паливних сумішей F_1 і F_2 приводиться до масових значень витрати горючої складової палива G_p вологи G_{H2O} та інерту G_{tt} , що надходять у киплячий шар.

Вихідними характеристиками в моделі є поточна температура киплячого шару T_L і об'єм газоповітряної суміші на виході з шару V_L .

Під час моделювання топкових процесів[24, 139] приймають такі допущення:

- маса киплячого шару матеріалу m_L , що знаходиться в шарі, є постійною величиною, з урахуванням безперервно працюючої системи золовидалення;
- суміш газів, що виходить із шару, має температуру, що дорівнює T_L ;
- коефіцієнт надлишку повітря підтримується системою автоматичного керування в межах, достатніх для повного вигорання летючих і коксового залишку;
- усі зміни параметрів частинок відбуваються дуже різко при переходах між комірками;
- вигорання коксового залишку відбувається у внутрішньодифузійній області [24, 139];
- під час роботи котлоагрегату ЦКШ можливий перехід з одного складу паливної суміші на іншу зі зміною основних параметрів (зольності, вологості тощо).

Виходячи з викладеного, рівняння теплового балансу має вигляд:

$$m_L \frac{dI_L}{dt} = Q_{gt} + Q_{air}^F + (Q_{F1} + Q_{F2})(1 - q_3 - q_4) - Q_{T1} - Q_{T2} - Q_{tt} - Q_{H2O} - Q_{SG} - Q_{Ch} \quad (4.1)$$

де I_L - питома ентальпія інертного матеріалу шару, кДж/кг. Своєю чергою, залежність $T_L = f(I_L)$ обчислюється як таблична величина за методикою [136];

Q_{gt} – кількість теплоти за одиницю часу, яка отримана від згорання рідкого палива під час розпалювання, кДж/с:

$$Q_{gt} = G_{gt} \cdot Q_{gt}^F \quad (4.2)$$

G_{gt} – витрата рідкого палива, кг/с;

Q_{gt}^F – нижча робоча теплота згорання рідкого палива, кДж/кг.

Q_{air}^F – кількість теплоти, що вноситься за одиницю часу в топку дуттьовим повітрям кДж/с;

$$Q_{air}^F = I_{air}(T_{air}) G_{air} \frac{273}{273+T_{air}} \quad (4.3)$$

$I_{air}(T_{air})$ – питома ентальпія повітря, кДж/(кг К);

T_{air} – температура повітря, яке подається в топку, °С;

G_{air} – продуктивність дуттьового вентилятора, кг/с.

Q_{F1}, Q_{F2} – кількість теплоти за одиницю часу, що вноситься в топку під час згоряння сухої горючої маси паливної суміші компонентів 1 і 2, відповідно, кДж/с;

Q_{T1}, Q_{T2} – кількість теплоти за одиницю часу, що забирається під час нагрівання паливної суміші компонентів 1 і 2 до температури шару, кДж/с.

Докладне виведення залежностей цих двох складових (Q_{F1} та Q_{F2}) з урахуванням фракційного складу наведено в роботі [139]. Результат можна надати в такому вигляді:

$$Q_F = Q_L^F \cdot G_F (1 - \tau_1) \quad (4.4)$$

$G_F (1 - \tau_1)$ – витрата паливної суміші з урахуванням запізнення τ_1 на транспортування до зони горіння, кг/с;

Q_L^F – нижча робоча теплота згоряння паливної суміші, кДж/кг. Цей параметр має інтегральне усереднення для суміші, враховуючі долю кожного компонента у суміші.

$$Q_{Fi} = c_{Fi} \cdot T_{Fi} \cdot G_F (1 - \tau_2) \quad (4.5)$$

c_{Fi} – теплоємність і-го компонента суміші, кДж/(кг К);

T_{Fi} – температура і-го компонента суміші, °С;

$G_F (1 - \tau_2)$ – витрата паливної суміші з урахуванням запізнення τ_2 на нагрівання частинок палива в зони горіння, кг/с.

Q_{tt} – кількість теплоти за одиницю часу, що відбирається на прогрівання інерту, кДж/с:

$$Q_{tt} = c_{tt} \cdot T_{tt} \cdot G_{tt} \quad (4.6)$$

c_{tt} – теплоємність інерту, кДж/(кг К);

T_{tt} – температура інерту, °С;

G_{tt} – витрата інерту, кг/с.

Q_{H_2O} – кількість теплоти за одиницю часу, що відбирається з топки на випаровування й прогрівання до температури шару вологи, яка міститься в паливній суміші. При цьому передбачається, що цей процес відбувається миттєво після потрапляння палива в шар, кДж/с:

$$Q_{H_2O} = r \cdot d_F \cdot G_F \quad (4.7)$$

r – теплота пароутворення води, кДж/кг;

d_F – абсолютна вологість паливної суміші, кг/кг;

G_F – витрата паливної суміші, кг/с.

Q_{SG} – кількість тепла, що відбирається з топки продуктами горіння твердих і рідких складових паливних сумішей, а також залишком дуттьового повітря, що не прореагував:

$$Q_{SG} = I_{SG}(T_L) G_{SG} \frac{273}{273+T_L} \quad (4.8)$$

$I_{SG}(T_L)$ – питома ентальпія димових газів при температурі киплячого шару, кДж/(кг К);

T_L – температура киплячого шару, оС;

G_{SG} – продуктивність димососу, кг/с.

Q_{Ch} – кількість теплоти за одиницю часу, що відбирається з топки інертом від палива при видаленні золи та для регулювання температури шару, кДж/с:

$$Q_{Ch} = c_{Ch} \cdot T_{Ch} \cdot G_{Ch} \quad (4.9)$$

c_{Ch} – теплоємність інерту, кДж/(кг К);

$T_{Ch} = T_L$ – температура інерту, дорівнює температурі шару, °С;

G_{Ch} – витрата інерту, кг/с.

q_3, q_4 – частка хімічного та механічного недопалу.

Далі обчислюється поточна ентальпія киплячого шару, а отже, і його температура, тобто основний технологічний параметр.

Після запису доданків рівняння (4.1) у вигляді приростів отримаємо рівняння в такому вигляді:

$$\frac{dT_L}{dt} S_L \rho_L c_L H_L = \Delta G_F \bar{Q}_L^F + \bar{G}_F \Delta Q_L^F + \Delta G_{air} \bar{c}_{air} \bar{T}_{air} + \bar{G}_{tt} \bar{c}_{tt} \Delta T_{tt} - \Delta G_{tt} \bar{c}_{tt} \bar{T}_{tt} - rd_F \Delta G_F - \bar{G}_{SG} \bar{c}_{SG} \Delta T_L - \Delta G_{SG} \bar{c}_{SG} \bar{T}_L - \bar{G}_{Ch} \bar{c}_{Ch} \Delta T_L - \Delta G_{Ch} \bar{c}_{Ch} \bar{T}_L \quad (4.10)$$

Параметри, що мають зверху риску відповідають номінальним значенням технологічного процесу. Знак Δ – відхиленню технологічного параметра від номінального значення.

Перенесемо шукану температуру киплячого шару в ліву частину рівняння та згрупуємо однакові змінні:

$$\frac{dT_L}{dt} S_L \rho_L c_L H_L + \bar{G}_{Ch} \bar{c}_{Ch} \Delta T_L + \bar{G}_{SG} \bar{c}_{SG} \Delta T_L = \Delta G_F \bar{Q}_L^F (t - \tau_1 - \tau_2) - rd_F \Delta G_F (t - \tau_1 - \tau_2) + \bar{G}_F \Delta Q_L^F + \Delta G_{air} \bar{c}_{air} \bar{T}_{air} + \bar{G}_{tt} \bar{c}_{tt} \Delta T_{tt} - \Delta G_{tt} \bar{c}_{tt} \bar{T}_{tt} - \Delta G_{SG} \bar{c}_{SG} \bar{T}_L - \Delta G_{Ch} \bar{c}_{Ch} \bar{T}_L \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{S_L \rho_L c_L H_L}{\bar{G}_{Ch} \bar{c}_{Ch} + \bar{G}_{SG} \bar{c}_{SG}} \frac{dT_L}{dt} + \Delta T_L = & \frac{\bar{Q}_L^F - rd_F}{\bar{G}_{Ch} \bar{c}_{Ch} + \bar{G}_{SG} \bar{c}_{SG}} \Delta G_F (t - \tau_1 - \tau_2) + \\ & \frac{\bar{G}_F}{\bar{G}_{Ch} \bar{c}_{Ch} + \bar{G}_{SG} \bar{c}_{SG}} \Delta Q_L^F + \\ + \frac{\bar{c}_{air} \bar{T}_{air}}{\bar{G}_{Ch} \bar{c}_{Ch} + \bar{G}_{SG} \bar{c}_{SG}} \Delta G_{air} + & \frac{\bar{G}_{tt} \bar{c}_{tt}}{\bar{G}_{Ch} \bar{c}_{Ch} + \bar{G}_{SG} \bar{c}_{SG}} \Delta T_{tt} + \frac{-\bar{c}_{tt} \bar{T}_{tt}}{\bar{G}_{Ch} \bar{c}_{Ch} + \bar{G}_{SG} \bar{c}_{SG}} \Delta G_{tt} + \\ & \frac{-\bar{c}_{SG} \bar{T}_L}{\bar{G}_{Ch} \bar{c}_{Ch} + \bar{G}_{SG} \bar{c}_{SG}} \Delta G_{SG} + \frac{-\bar{c}_{Ch} \bar{T}_L}{\bar{G}_{Ch} \bar{c}_{Ch} + \bar{G}_{SG} \bar{c}_{SG}} \Delta G_{Ch} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Як можна побачити рівняння описує властивості температури киплячого шару як інерційної ланки першого порядку. У роботі [24, 139] наведені криві розгону цього об'єкту керування, де видно, що за каналом витрати палива він має властивості ланки другого порядку, але транспортне запізнення значно переважає. Тому у подальшому приймаємо в якості моделі поєднання інерційної ланки першого порядку з транспортним запізненням.

Експериментальні характеристики [24] зміни температури ЦКШ у разі ступінчастих впливів за продуктивністю закидувача й дуттьового вентилятора відповідно подано на рис. 4.5 і 4.6.

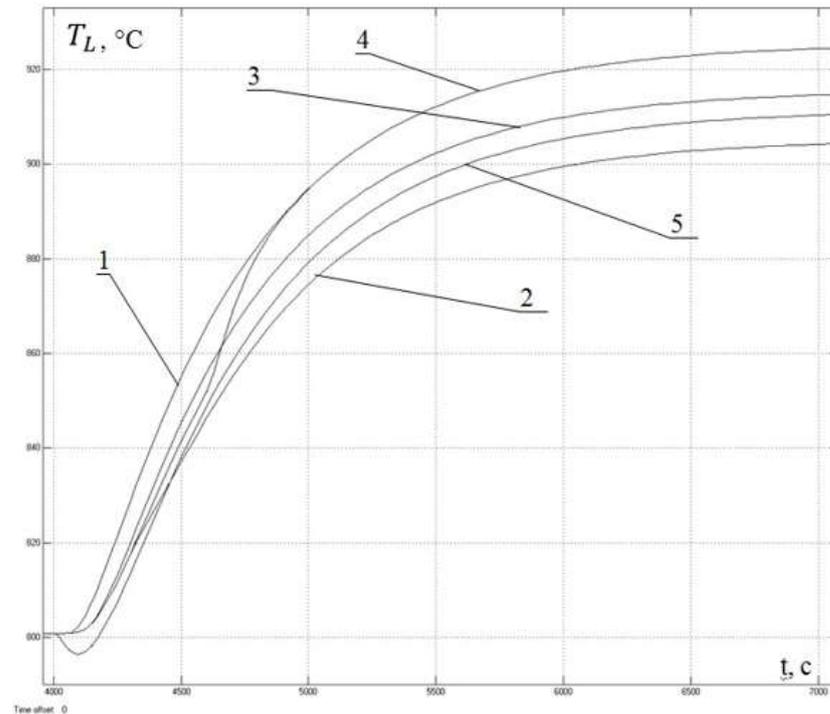


Рисунок 4.5. Зміни температури ЦКШ під час ступінчастого впливу за продуктивністю закидувача $\Delta V_F = +0,04 \text{ м}^3/\text{год}$ під час експерименту (лінії 1 - 4) і моделювання (лінія 5) [24]

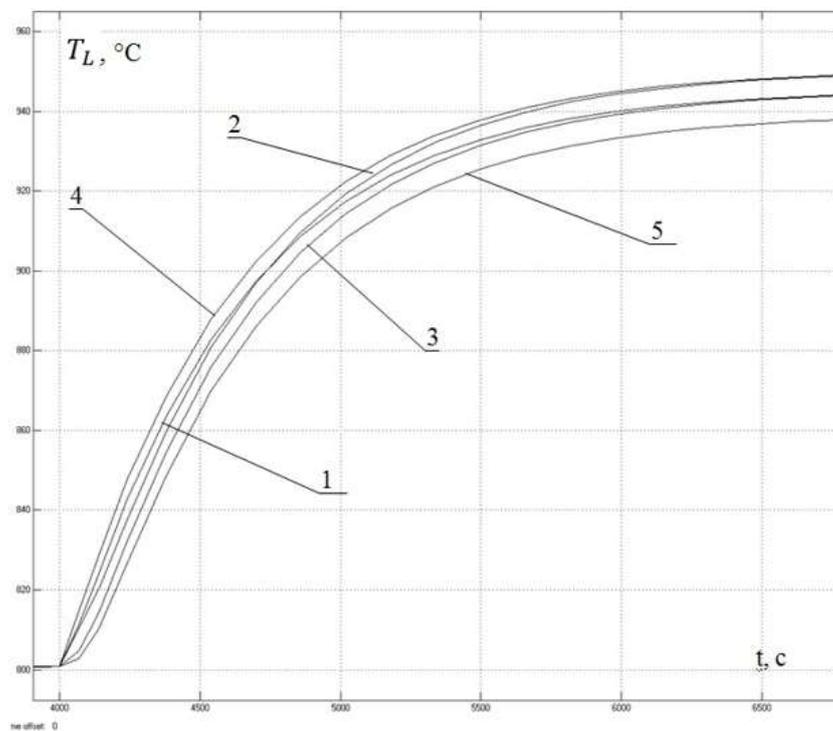


Рисунок 4.6. Зміни температури ЦКШ під час ступінчастого впливу за продуктивністю дуттьового вентилятора $\Delta V_{air} = -0,2 \text{ м}^3/\text{с}$; під час експерименту (лінії 1 - 4) і моделювання (лінія 5) [24]

Зсув у часі в 4000 с обумовлений процесом розпалювання котлоагрегату.

Після обробки кривих розгону були отримані передавальні функції за відповідними каналами:

За каналом $\Delta V_F \rightarrow \Delta T_L$:

$$W(s) = \frac{k}{Ts+1} e^{-\tau s} = \frac{3750}{1900s+1} e^{-120s} \quad (4.13)$$

За каналом $\Delta V_{air} \rightarrow \Delta T_L$:

$$W(s) = \frac{k}{Ts+1} e^{-\tau s} = \frac{-700}{1750s+1} e^{-80s} \quad (4.14)$$

Оскільки постійні часу й величини запізнювання визначаються геометричними розмірами апарата й повинні уточнюватися індивідуально для кожної установки, то на даному етапі дослідження прийняті відповідно до експериментальних даних [24].

4.4.2 Математична модель передачі тепла робочому тілу в поверхнях нагріву

Математична модель котла у якому спалюється ТПВ складається з 6 ділянок, зображених на рис. 4.7 [140, 141]. Кожна ділянка пронумерована. Вихід однієї ділянки є входом для іншої. Кожна ділянка описується диференціальним рівнянням. Як показано в [140], деякі розділи описуються двома диференціальними рівняннями. Ділянки 1 і 2 описують процеси теплообміну, пов'язані з радіаційним і конвективним нагріванням поверхонь. Ділянки 1' і 2' описують допоміжні диференціальні рівняння, що пов'язують вхідні дані з виділенням тепла випромінюванням і конвекцією. Ділянка 3 описує процеси, які відбуваються в барабані котла. Ділянка 4 описує паропровід.

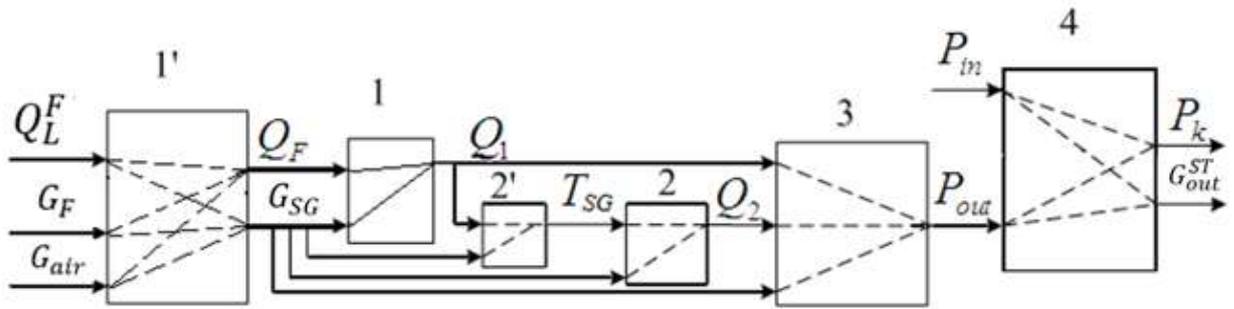


Рисунок 4.7 – Структура математичної моделі [140]

На рисунку й надалі введені такі позначення:

Q_L^F – нижня теплота згоряння робочої маси палива у вигляді ТПВ;

G_F – витрата твердої паливної суміші у вигляді ТПВ;

G_{air} – витрата повітря;

Q_F – кількість тепла, що виділяється при згорянні палива у вигляді ТПВ;

G_{SG} – витрата димових газів;

Q_1 – кількість тепла, що передається робочому тілу променистим теплообміном;

Q_2 – кількість тепла, що передається робочому тілу конвективним теплообміном;

T_{SG} – температура димових газів;

P_{in} – тиск на вході в котел;

P_{out} – тиск у барабані котла; P_k – тиск на виході з котла;

G_{out}^{ST} – витрата пари на виході з котла.

У першу чергу уточнимо модель виділення тепла при горінні.

Відомо, що тепло, яке виділяється при спалюванні, може бути розраховане за формулою:

$$Q_F = G_F Q_L^F \quad (4.15)$$

Так як модель спалювання розглядається у відхиленнях, проведемо лінеаризацію (1) та запишемо вираз у відхиленнях

$$\bar{Q}_F + \Delta Q_F = (\bar{G}_F + \Delta G_F) (\bar{Q}_L^F + \Delta Q_L^F) \quad (4.16)$$

Після відкриття дужок і врахування виразу (2) можна записати:

$$\Delta Q_F = \bar{G}_F \Delta Q_L^F + \bar{Q}_L^F \Delta G_F \quad (4.17)$$

Зазвичай другий доданок відкидається як такий, що має другий порядок малості. Однак, так як відхилення теплотворної здатності біогазу настільки велике, то в даному випадку розрахунок в моделі проводиться за виразом (4.18).

Далі розглянемо й уточнимо модель передачі тепла конвекцією. Зміна коефіцієнту надлишку повітря α в області достатньо великих надлишків незначно впливає на Q_F , але може сильно відбитися на розподілі теплосприяння між окремими поверхнями нагріву. Зі зміною α зв'язана зміна питомої кількості димових газів, і як наслідок температури газів T_{SG} у топці.

Математична модель конвективного теплообміну.

У роботах [25, 138, 139, 140, 142] наведено виведення диференціальних рівнянь та вхідних до них коефіцієнтів. Тому тут наводяться лише результуючі співвідношення. Кількість теплоти, що передається від димових газів теплоносія, може бути описана системою рівнянь:

Тепловий баланс [140] на боці газу, що гріє:

$$m_{SG} c_{SG} \frac{dT_{SG}}{dt} + Q_2 = G_{SGin} c_{SGin} T_{SGin} - G_{SGout} c_{SGout} T_{SGout} \quad (4.18)$$

Баланс речовини на стороні димових газів (накопичення маси димових газів немає):

$$G_{SGout} = G_{SGin} \quad (4.19)$$

Відхилення кількості теплоти в системі "газ, що гріє - труба" конвекцією

$$\Delta Q_2 = 0.33 k_4 \bar{G}_{SG}^{-0.33} \frac{\bar{T}_{SGin} + \bar{T}_{SGout} - 2T_m}{2\bar{G}_F} \Delta G_{SG} + 0.5 k_4 \bar{G}_{SG}^{-0.33} (\Delta T_{SGin} + \Delta T_{SGout}) \quad (4.20)$$

де G_{SG} – витрата димових газів;

G_F – витрата твердої паливної суміші;

m_{SG} – маса газу в елементі;

c_{SG} – питома теплоємність газів;

T_m – температура метала труб;

T_{SG} – температура газів;

Q_2 – тепловий потік від газу до стінки;

k_4 – коефіцієнт.

Залежність кількості теплоті від витрати димових газів та температури газів у часі описується диференціальним рівнянням, яке врахує конвективний та радіаційний теплообмін. Було прийнято, що радіаційний теплообмін складає 15% від конвективного. Таке припущення пояснюється невисокою температурою (до 900° С) згоряння ТПВ, що зумовлено їхньою високою вологістю. [140]:

$$T_2 \frac{dQ_2}{dt} + \Delta Q_2 = a_2 \Delta G_{SG} + b_2 \frac{dG_{SG}}{dt} + c_2 \Delta T_{SGin} \quad (4.21)$$

де

$$a_2 = c_{SG} \frac{0.33(4\bar{T}_{SGin} - \bar{T}_{SGout} - 3T_m)}{1 + \frac{2c_{SG}\bar{G}_{SG}^{0.33}}{k_4}}$$

$$b_2 = c_{SG} \frac{0.33m_{SG}(\bar{T}_{SGin} - \bar{T}_{SGout} - 2T_m)}{\bar{G}_{SG}\left(1 + \frac{2c_{SG}\bar{G}_{SG}^{0.33}}{k_4}\right)}$$

$$c_2 = \frac{1}{\frac{1}{k_4\bar{G}_{SG}^{0.33}} + \frac{1}{2c_{SG}\bar{G}_{SG}}}$$

$$T_2 = \frac{c_{SG}m_{SG}}{k_4\bar{G}_{SG}^{-0.33} + 2c_{SG}\bar{G}_{SG}}$$

4.4.3 Мінімізація викидів шкідливих речовин

Сучасні екологічні вимоги, спрямовані на захист навколишнього середовища, зокрема зниження викидів діоксиду сірки (SO₂) та оксидів азоту (NO_x), висувають нові виклики до технології спалювання ТПВ. Якщо розглядати технологію пиловугільного (факельного) спалювання можна відзначити, що зниження емісії NO_x частково досягається завдяки змінам у конструкції пальників, модифікації режимів роботи або поліпшенню

аеродинамічних характеристик факела. У той же час, зниження емісії SO_2 у рамках традиційної пиловугільної технології малоефективне, оскільки при температурі 1200–1500 °С майже 100% сірки з палива переходить у SO_2 .

Дослідження існуючих технологій спалювання [21] демонструють, що одним із перспективних напрямів розв'язання екологічних проблем, пов'язаних зі спалюванням ТПВ є впровадження технології циркулюючого киплячого шару. Типовими для котлів із ЦКШ під час спалювання ТПВ є концентрації NO_x , що дорівнюють 100-200 мг/м³ за нормальних умов і вміст кисню в димових газах добігає 6%. Для палив із високим вмістом летких компонентів концентрація NO_x може досягати 250 мг/м³. Аналіз міжнародного досвіду [21] підтверджує, що підвищення температури шару вище 850 °С призводить до зростання концентрацій NO_x , а збільшення частки первинного повітря значно впливає на підвищення викидів NO_x , причому найбільше її підвищення відноситься до режимів з часткою первинного повітря понад 70%. Крім того, збільшення надлишку повітря (концентрації кисню) на виході з топки також корелює із зростанням концентрації NO_x .

Під час спалювання палива в ЦКШ частка азоту, що переходить у NO_x , істотно зменшується зі зростанням вмісту азоту на горючу масу (рис. 4.8). [21].

Виявлено також вплив відношення мольних концентрацій C_{Ca} і C_{S} на викиди NO_x . При збільшенні значення $C_{\text{Ca}}/C_{\text{S}}$ від 1.5 до 4.0 викиди NO_x зростають від 150 до 250 мг/м³. Процес доволі складний і недостатньо вивчений, материнський азот палива під час виходу летких переходить у газову фазу у вигляді NH_3 і HCN і далі в присутності CaO і коксу частково перетворюється на NO через проміжне утворення N_2O і частково відновлюється до N_2 . При цьому далі по висоті шару концентрація N_2O знижується, а концентрація NO_x зростає. Зі зростанням надлишку повітря концентрація NO_x , приведена до нормальних умов, за вмісту кисню 6% завжди збільшується. Однак у дослідженнях [143] відзначено зниження концентрації закису азоту N_2O за збільшення надлишку повітря.

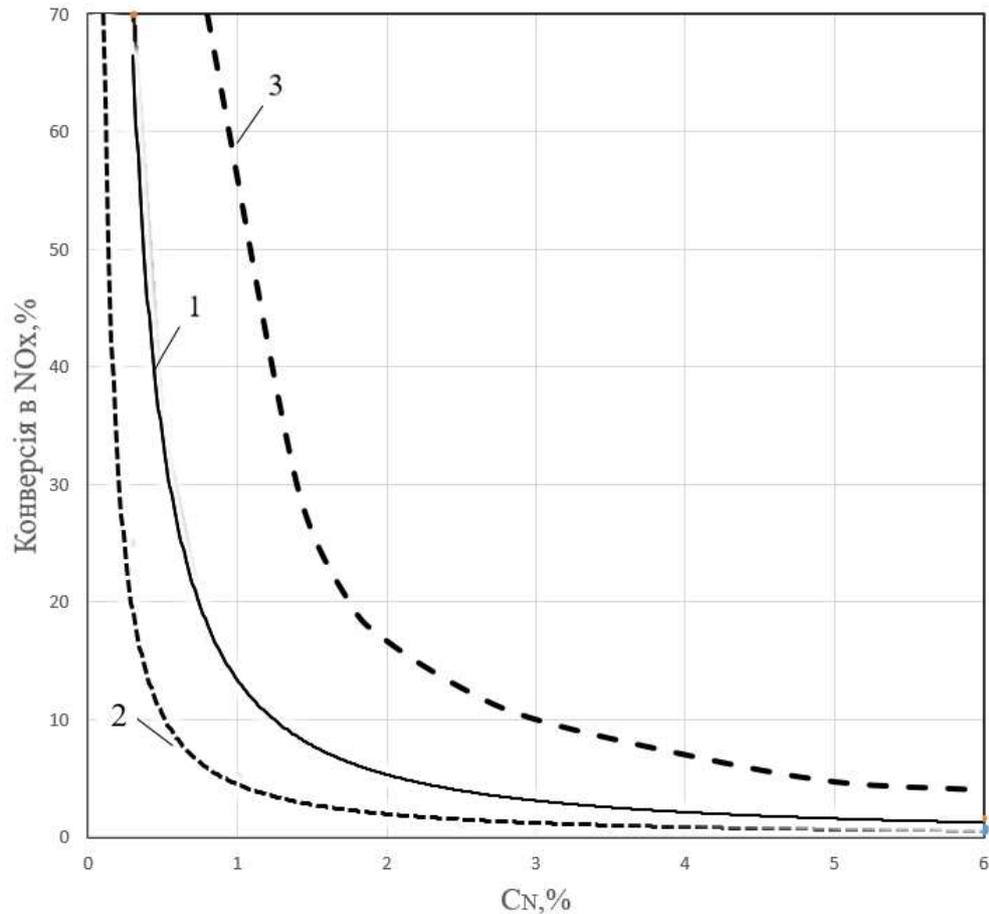


Рисунок 4.8. Залежність конверсії азоту палива в NO_x від вмісту азоту C_N на горючу масу при температурі шару 800 °C (1, 2) і 850 °C (3), концентрації O₂ 10% за об'ємом (1, 3) і 8% за об'ємом (2) [21].

У [144] досліджено вплив умов подачі первинного повітря на викиди оксидів азоту. Експерименти проводилися на котлі енергоблока потужністю 235 МВт на ТЕС Turow у Польщі. Моделювання розподілу первинного повітря виявило його нерівномірний розподіл по поверхні шару. Для підвищення рівномірності можна було збільшити опір повітророзподільної решітки, але це рішення визнали недоцільним через зростання витрат на власні потреби енергоблока. Було змінено форму камери розподілу первинного повітря, встановлено профілі на вході в камеру, що розділяють потоки на три зони з однаковими витратами. Результати показали, що розподіл температур у топці став більш рівномірним, температури в шарі знизилися приблизно на 50 °C, а викиди оксидів азоту зменшилися в середньому на 10%.

Викиди N_2O для котлів з ЦКШ не перевищують 100 мг/м^3 і знижуються зі зростанням температури. Закис азоту є у 200 разів більш шкідливим компонентом парникових газів, ніж CO_2 , але його концентрація за котлами з ЦКШ у 10000 разів нижча, ніж концентрація CO_2 . Таким чином, внесок закису азоту порівняно з іншими парниковими газами є малим, тому інтерес до проведення більш детальних досліджень утворення та придушення викидів N_2O не дуже високий.

Особливий інтерес у рамках технології ЦКШ викликає можливість зниження викидів діоксиду сірки SO_2 шляхом введення до шару вапняку, який вступає у реакції кальцинації та сульфатації.



Ці процеси дозволяють ефективно зв'язувати SO_2 , хоча використання оксиду кальцію обмежується приблизно 40% через утворення сульфатної скоринки на поверхні частинок вапняку [21]. Збільшення значення C_{Ca}/C_S в більш ніж 2.5 рази мало впливає на подальше зниження викидів оксидів сірки. Оптимальною для цього процесу вважається температура близько $850 \text{ }^\circ\text{C}$, яка забезпечує достатню реакційну активність і сприяє максимальному ступеню уловлювання SO_2 . Варто зазначити, що під час спалювання ТПВ з високою зольністю оптимальна температура може бути меншою, що пов'язано з особливостями хімічних реакцій, які відбуваються в шарі.

На рис. 4.9 наведено залежність ступеня зв'язування сірки від відношення C_{Ca}/C_S . У режимах без подачі вапняку відношення C_{Ca}/C_S знаходиться на рівні 0.2-0.3, а ступінь зв'язування становить 4-9%. Найбільший ступінь зв'язування сірки належить до режимів зі зниженими навантаженням і температурою шару [21, 145].

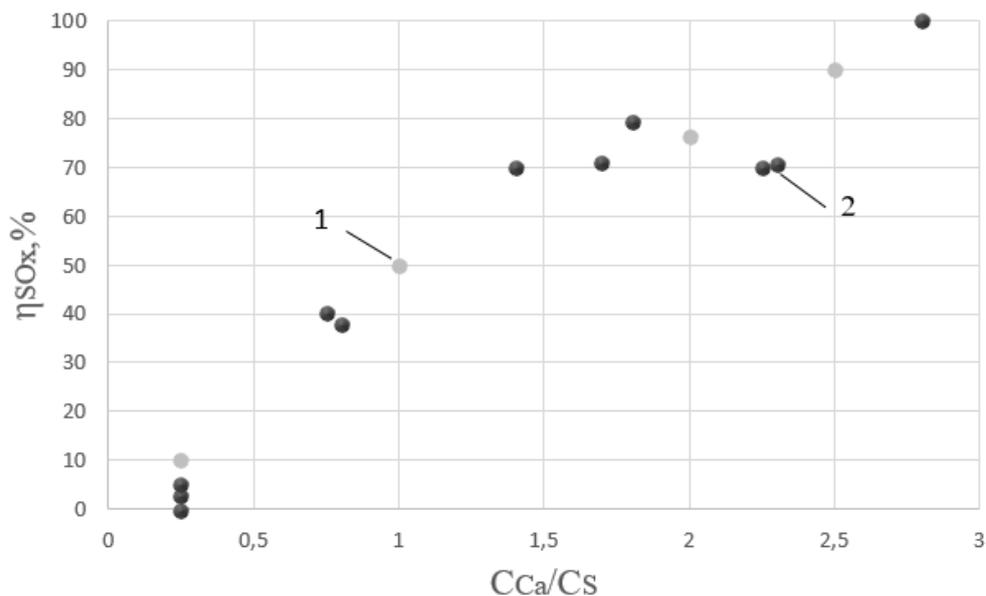


Рисунок 4.9. Залежність ступеня зв'язування оксидів сірки від відношення C_{Ca}/C_S , отримана у квітні 2018 р. (1) і листопаді 2017 р. (2)[21]

Зниження викидів оксидів сірки досягається завдяки покращенню якості матеріалу шару, зокрема, шляхом зменшення розміру частинок леткої золи до менш ніж 0,05 мм, а донної золи — до менш ніж 0,2 мм. Дрібніші частинки вапняку забезпечують більшу площу поверхні для реакції, що підвищує ефективність процесу. У той же час поліпшується вловлювання частинок у циклонах, що сприяє збільшенню часу їхнього перебування в топці та більш ефективному використанню вапняку.

З 2015 року в деяких регіонах Китаю запроваджено вимоги, що передбачають, що під час будівництва нових електростанцій при спалюванні палива у вигляді ТПВ викиди шкідливих речовин від котлів мають відповідати рівню установок зі спалюванням природного газу. Граничні рівні викидів становлять, мг/м³: оксиди азоту — 50, оксиди сірки — 35, тверді частинки — 5. Такі заходи вже впроваджено на одному з котлів із циркулюючим киплячим шаром (ЦКШ) у Китаї [146].

Аналіз наявних даних свідчить, що процес десульфурації за допомогою вапняку досягає максимальної ефективності (мінімальна концентрація SO₂ у димових газах спостерігається) за температури шару в межах 840–870 °С.

Варто зазначити, що такі температурні режими є робочими для більшості топок із циркулюючим киплячим шаром (ЦКШ), оскільки саме в цьому діапазоні забезпечується належна ефективність спалювання твердого палива та безшлакова робота шару.

Оскільки температура реагуючого вапняку лише незначно відрізняється від температури шару, можна зробити висновок, що оптимальна температура для зв'язування SO_2 вапняком, що подається, також становить 840–870 °С.

Водночас процес зв'язування діоксиду сірки активними сорбентами золи здійснюється на поверхні або всередині палаючої частинки ТПВ. Через це температурний режим, необхідний для цього процесу, значно відрізняється від загальної температури шару. Відомо, що температура палаючої частинки ТПВ в шарі може перевищувати температуру самого шару на кілька градусів або навіть на десятки чи сотні градусів. Це залежить як від умов горіння частинки, так і від типу палива, яке використовується.

Таким чином, під час спалювання палива у вигляді ТПВ оптимальна температура десульфурації має суттєво відрізнитися від температури, за якої відбувається уловлювання SO_2 вапняком, і знижуватися.

На рисунку 4.10 наведено залежності ступеня уловлювання SO_2 під час спалювання ТПВ різної зольності від температури шару. Як видно з графіка, максимальне значення ступеня уловлювання діоксиду сірки (η_{SO_2}) золою палива у вигляді ТПВ із зольністю 37,9% і 41,7% спостерігається за температури 750–770 °С. Для ТПВ з більш високою зольністю ($A_p = 61,8\%$) оптимальна температура виражена менш чітко, а для ТПВ з $A_p = 68,2\%$ оптимум взагалі не спостерігається — зі зменшенням температури шару ступінь уловлювання η_{SO_2} зростає.

За температури шару близько 800 °С ступінь уловлювання SO_2 , залежно від зольності ТПВ, становить 60–90%. При цьому найбільша ефективність уловлювання SO_2 спостерігається у палива у вигляді ТПВ із зольністю 68,2%.

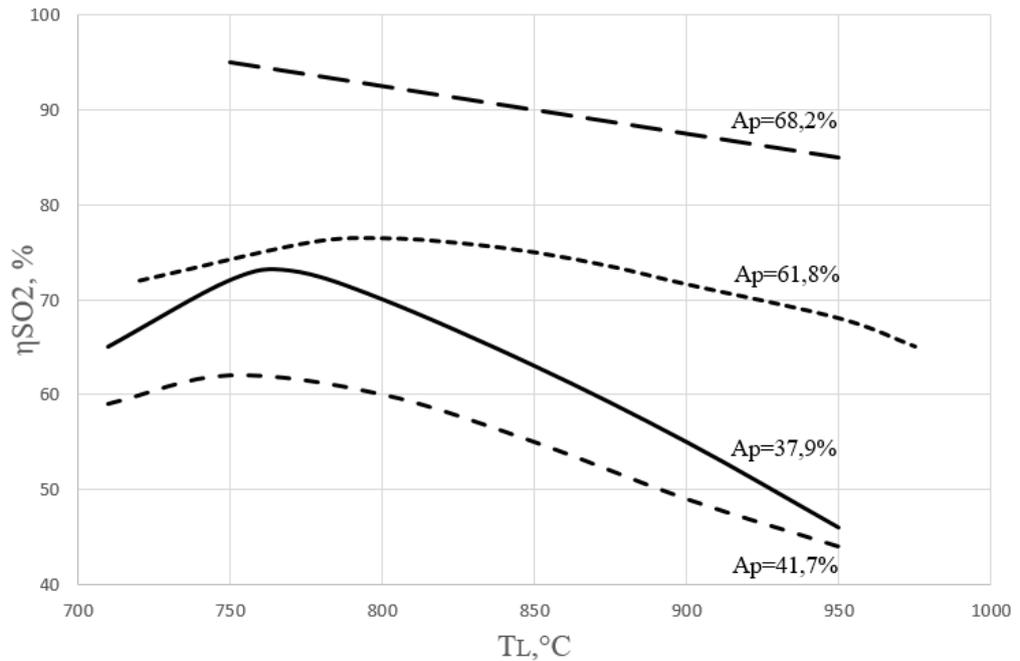


Рисунок 4.10 Залежність ступеня уловлювання SO_2 золюю палива у вигляді ТПВ від температури шару без добавки вапняку [21]

Як видно з рисунка 4.10, оптимальна температура під час спалювання палива у вигляді ТПВ за мольного співвідношення $Ca/S = 0,88$ становила 750–770 °C, при цьому максимальне значення ступеня уловлювання SO_2 (η_{SO_2}) досягало 65%.

При додаванні до цього самого палива у вигляді ТПВ 5% вапняку, що відповідає мольному співвідношенню $Ca/S = 3,63$, ступінь уловлювання SO_2 збільшився до 85%, а оптимальна температура становила 825–830 °C.

Подальше підвищення вмісту вапняку до 10% зі збільшенням Ca/S до 6,65 призвело до незначного зростання η_{SO_2} — до 87%, при збереженні тієї ж самої оптимальної температури 825–830 °C.

Утворення HCl сприяє корозії пароперегрівачів та утворенню відкладень. Хлор палива окислюється переважно до HCl , проте є й інші важливі чинники, які можуть призводити до утворення молекулярного хлору, включаючи реакції з алюмосилікатами. На рис. 4.11 показано схему можливих взаємодій сірки з хлоринами, важкими металами та лужними елементами за даними [21, 147].

Хлорини й особливо Cl_2 можуть призводити до утворення діоксинів і фуранів. Мідь і залізо можуть слугувати каталізаторами утворення фуранів. У котлах з ЦКШ відбувається істотне зниження цих викидів навіть за відносно низьких температур спалювання (час перебування в реакційній зоні при температурі понад $800\text{ }^\circ\text{C}$ не менше 3 с). Під час спалювання ТПВ у котлах із ЦКШ концентрації діоксинів і фуранів різко знижуються в разі додавання вугілля.

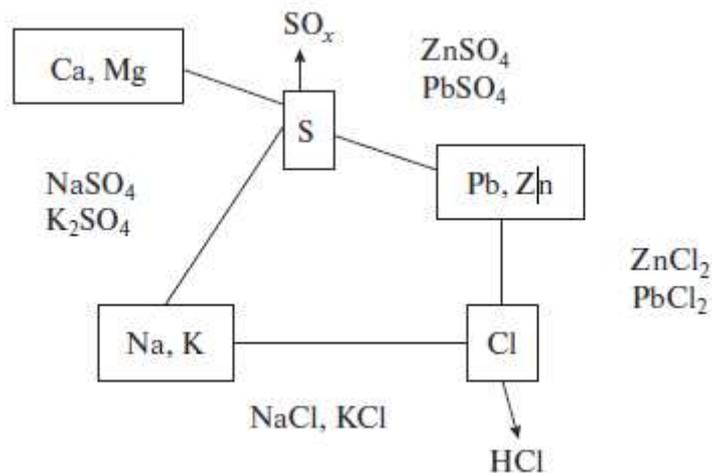


Рисунок 4.11. Можливі взаємодії сірки з хлоринами, важкими металами та лужними елементами [21]

На закінчення аналізу джерел можна зробити такі висновки:

Типовими для котлів із ЦКШ під час спалювання палива у вигляді ТПВ є концентрації NO_x у викидах, що дорівнюють $100\text{--}200\text{ мг/м}^3$ за нормальних умов і вміст кисню в димових газах, 6%. Для палив з дуже великим виходом летких можливе збільшення концентрації NO_x до 250 мг/м^3 .

Однією з основних переваг спалювання в киплячому шарі є можливість ефективного видалення діоксиду сірки SO_2 шляхом подачі в шар вапняку. Разом з тим, сульфат кальцію у формі розплаву утворює скоринку на поверхні оксиду кальцію й різко знижує подальше проходження реакції. Тому забезпечити використання CaO можливо не більше ніж на 40% його вмісту у вапняку. Оптимальна температура в топці становить приблизно $850\text{ }^\circ\text{C}$.

Збільшення відношення молярних концентрацій C_{Ca}/C_S в 2.5 рази мало впливає на подальше зниження викидів оксидів сірки.

Можливість ефективного спалювання різних палив у котлах із ЦКШ дає змогу використовувати їх для спільного спалювання ТПВ та викопного палива. Для низки європейських країн це може бути вирішальним фактором, якщо враховувати, що біомаса нейтральна щодо викидів CO_2 . Спалювання до 10% біомаси за тепловиділенням дасть змогу знизити викиди CO_2 на 18-22%.

Найбільш важливими проблемами під час спалювання ТПВ є агломерація шару, забруднення поверхонь нагріву та корозія високотемпературних поверхонь нагріву. Вивченню складних процесів взаємодії між елементами золи ТПВ та матеріалом шару (агломерація), утворення відкладень і корозії поверхонь під шаром відкладень приділяється велика увага.

Таким чином, використання технології ЦКШ для спалювання палива у вигляді ТПВ відкриває нові можливості для забезпечення екологічної безпеки, включаючи зниження викидів оксидів азоту, сірки, що є особливо важливим у контексті сучасних вимог до збереження довкілля.

4.5. Дослідження об'єкта керування за його динамічною моделлю.

4.5.1. Синтез імітаційної моделі

На основі наведеного вище опису установки було розроблено імітаційну математичну модель, яка описує динамічні властивості апарата за такими каналами:

витрата паливної суміші у вигляді ТПВ G_F – навантаження N ;

витрата паливної суміші у вигляді ТПВ G_F – температура шару T_L ;

витрата паливної суміші у вигляді ТПВ G_F – рівень (товщина) шару L ;

витрата води на охолодження інерту $G_{охл_в}$ – температура шару T_L ;

витрата води на охолодження інерту $G_{охл_в}$ – навантаження N ;

витрата води на охолодження інерту $G_{охл_в}$ – концентрація діоксиду сірки c_s ;

витрата вапняку G_{lime} – концентрація діоксиду сірки c_s ;

витрата золи G_{ash} – рівень (товщина) шару L ;

витрата первинного повітря G_{air1} – рівень (товщина) шару L ;

витрата первинного повітря G_{air1} – тиск повітря перед розподільчою решіткою P_{air1} ;

витрата вторинного повітря G_{air2} — склад димових газів (економічність) c_{O_2} , c_{CO_2} ;

склад паливної суміші у вигляді ТПВ – навантаження N ;

склад паливної суміші у вигляді ТПВ – температура шару T_L ;

склад паливної суміші у вигляді ТПВ – склад димових газів (економічність) c_{O_2} , c_{CO_2} ;

Параметрична схема регульованого апарату наведена на рисунку 4.12.

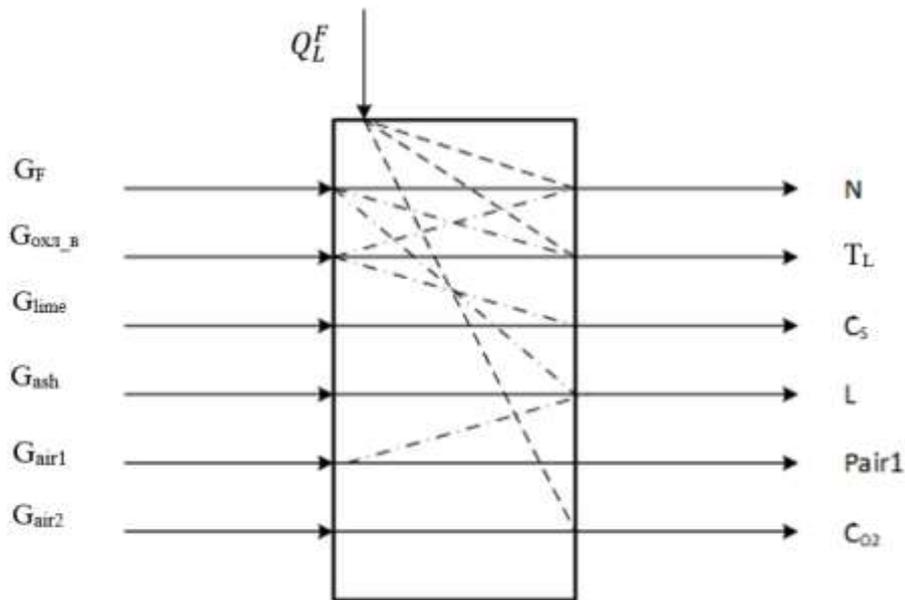


Рисунок 4.12 Параметрична схема регульованого апарату [24]

Взаємозв'язки між вхідними й вихідними параметрами регульованого апарату можуть бути представлені у вигляді таблиці передавальних функцій. Коефіцієнти передачі передавальних функцій було визначено з розрахунку процесу горіння за допомогою моделей, описаних в розділі 4.4.

Таблиця 4.1

	витрата паливної суміші G_F , кг/с	витрата охолоджувальної води, кг/с	витрата вапняку, кг/с	витрата золи (шихти), кг/с	витрата повітря 1 G_{air1} , м ³ /с	витрата повітря 2 G_{air2} , м ³ /с	склад паливної суміші
потужність агрегату N , %	$W(s) = \frac{K_{GF} e^{-\tau s}}{T_{2N}^2 s^2 + T_{1N} s + 1}$		—				$W(s) = \frac{K_L e^{-\tau s}}{T_{2N}^2 s^2 + T_{1N} s + 1}$
температура шару T_L , С	$W(s) = \frac{42 e^{-\tau s}}{T_{L1} s + 1}$	$W(s) = \frac{-13 e^{-\tau s}}{T_{L2} s + 1}$			$W(s) = \frac{-35 e^{-\tau s}}{T_{L1} s + 1}$		$W(s) = \frac{K(G_F, G_{air1}) e^{-\tau s}}{T_{L1} s + 1}$
кількість сполук сірки, C_{SO2}	$W(s) = \frac{K_{Sx} e^{-\tau s}}{T_1 s + 1}$		$W(s) = \frac{-K_{Lime} e^{-\tau s}}{T_1 s + 1}$				$W(s) = \frac{K(G_F, G_{air1}) e^{-\tau s}}{T_1 s + 1}$
рівень псевдо-рідинного шару, L	$W(s) = \frac{K_{GF} e^{-\tau s}}{T_3 s}$			$W(s) = \frac{-K_{ASH} e^{-\tau s}}{T_3 s}$	$W(s) = \frac{K_{G_{air1}} e^{-\tau s}}{T_4 s + 1}$		
витрата повітря G_{air1} , м ³ /с					$W(s) = \frac{1}{T_5 s + 1}$		
склад димових газів C_{O2}, C_{CO2} ,	$W(s) = \frac{K(G_F, G_{air1}) e^{-\tau s}}{T_{2C}^2 s^2 + T_{1C} s + 1}$				$W(s) = \frac{K(G_F, G_{air1}) e^{-\tau s}}{T_{2C}^2 s^2 + T_{1C} s + 1}$	$W(s) = \frac{K(G_F, G_{air2}) e^{-\tau s}}{T_{2C}^2 s^2 + T_{1C} s + 1}$	$W(s) = \frac{K(G_F, G_{air1}) e^{-\tau s}}{T_{2C}^2 s^2 + T_{1C} s + 1}$

4.5.2 Методи керування топками з ЦКШ

Температуру в топці киплячого шару необхідно регулювати в робочих межах, які визначаються характеристиками палива у вигляді ТПВ і вимогами зв'язування сірки. Температура має бути досить високою для того, щоб підтримати горіння палива, але не настільки, щоб відбувалося оплавлення золи. Звичайний діапазон температур 800-950 °С. Оптимальна температура для зв'язування сірки близька до 850 °С. Швидкість згорання ТПВ в киплячому шарі становить близько 1,5 МВт/м² (площі шару) за надлишку повітря 25% і швидкості домішки, що сягає, 2,5 м/с.

Близько половини тепла, що виділяється, витрачається на підвищення температури повітря й палива у вигляді ТПВ, що подаються в шар, а інша половина поглинається теплосприймальними трубами, зануреними в киплячий шар.

Коли потрібно знизити навантаження, необхідно одночасно знижувати витрату ТПВ і повітря для підтримки ефективної роботи топки у всьому діапазоні регулювання. Разом із цією зміною навантаження в тій самій пропорції має зменшуватися тепловий потік до занурених труб. За рахунок зміни температури шару можна досягти лише порівняно невеликого зменшення навантаження. Набагато більший діапазон регулювання можливий у разі поділу шару на кілька сегментів, які залежно від необхідного навантаження можуть бути у зваженому або нерухомому станах. При використанні цього методу регулювання кількості інертного матеріалу в киплячому шарі залишається постійним. Недолік методу полягає в тому, що динамічний відгук залежить від теплоємності шару і, отже, буде дещо уповільненим.

Метод регулювання навантаження, заснований на використанні взаємозв'язку між ступенем розширення киплячого шару й швидкістю охолодження для зміни висоти шару і, таким чином, зануреної величини теплосприймальної поверхні, забезпечує можливість отримання широкого діапазону регулювання навантаження з коротким перехідним процесом, тому

що тепловий потік до заглиблених труб приблизно у 4 рази перевищує тепловий потік до труб, які перебувають над киплячим шаром.

Структурна схема імітаційної моделі об'єкта керування показана на рисунку 4.13.

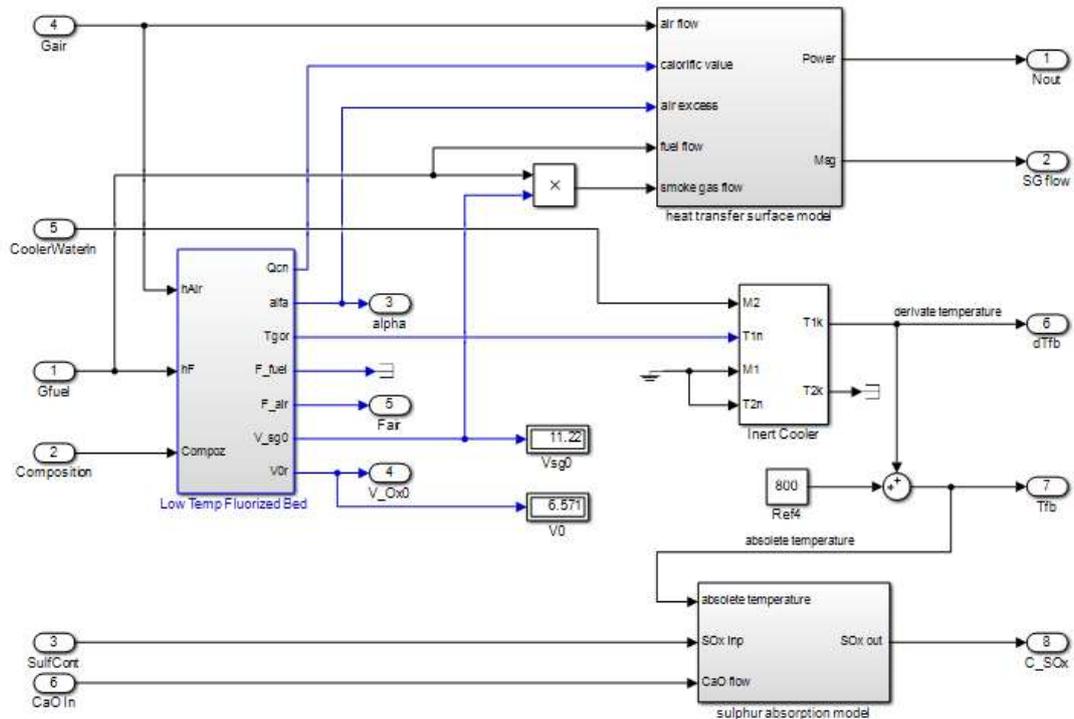


Рисунок 4.13 Структурна схема імітаційної моделі об'єкта керування[24]

Імітаційна модель, що наведена на рисунку, складається з чотирьох ділянок:

- моделі топки низько температурного киплячого шару «*Low Temp Fluorized Bed*»;
- моделі теплообмінних поверхонь «*heat transfer surface model*»;
- моделі теплообміннику для охолодження шихти «*Inert Cooler*»;
- моделі зв'язування сполук сірки «*sulphur absorption model*».

Кожна з моделей була отримана у результаті попередніх досліджень [138, 139, 140].

Таким чином в об'єкті регульованими параметрами є:

- навантаження (вимірюваним параметром може бути тиск пари після котла);
- температура киплячого шару;
- концентрація діоксиду сірки в димових газах;
- економічність процесу спалення (вимірюваним параметром є склад димових).

Керуючими впливами є:

- витрата паливної суміші (ТПВ);
- витрата води на охолодження шихти;
- витрата вапняку;
- витрата вторинного повітря.

Зовнішніми збуреннями на об'єкт є:

1. Задане навантаження (потужність) установки;
2. Склад паливної суміші (ТПВ).

Схему імітаційної моделі АСК установки для спалення ТПВ показано на рисунку 4.14

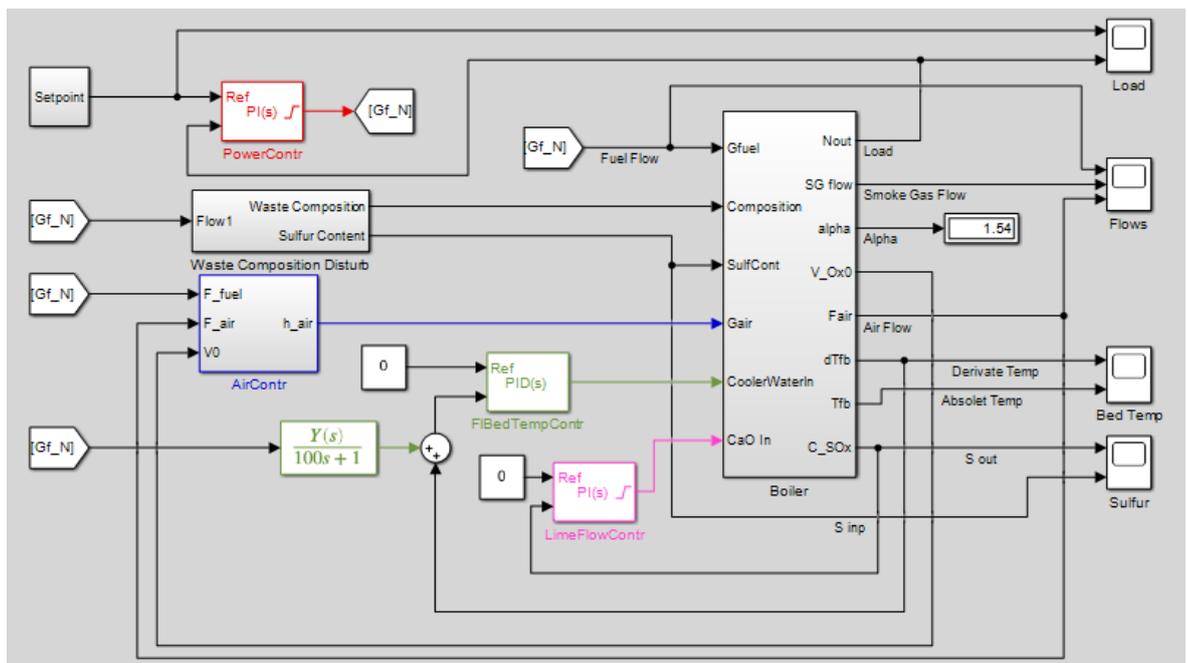


Рисунок 4.14 Схема імітаційної моделі АСК установки спалювання ТПВ [24]

На рисунку застосовано такі позначення:

Boiler — об'єкт управління, описаний вище й структурна схема якого наведена на рисунку 4.13;

PowerContr — регулятор потужності установки;

AirContr — регулятор економічності (витрати повітря);

FlBedTempContr — регулятор температури киплячого шару;

LimeFlowContr — регулятор витрати вапна;

Waste Composition Disturb — пристрій моделювання складу паливної суміші (ТПВ);

Load, Flows, Bed Temp, Sulfur — блоки виведення графіків (Scope);

Setpoint — блок сигналу завдання потужності.

Виходячи з властивостей об'єкта керування за каналами керування висоти киплячого шару, а саме підтримання витрати первинного повітря та відведення шихти (шлаку) не розглядалося, оскільки для підтримання цих параметрів достатньо штатних систем керування.

Пропонована система керування має наступні особливості.

Для компенсації впливу складу паливної суміші (ТПВ) використано засіб визначення бруто формули палива [61]. Визначення бруто формули ТПВ дає можливість з випередженням визначити теплотворну здатність палива та визначити теоретичну кількість повітря, яке йде на спалення. Ця інформація подається на регулятор навантаження та регулятор економічності, відповідно.

Однак дослідження показали, що топка з ЦКШ має доволі велику інерційність, як за витратою ТПВ так й витратою повітря, тому різка зміна витрати паливної суміші може призвести до «завалу» топки і виникнення аварійного стану. Тому було прийняте рішення відмовитись від введення в регулятор потужності сигналу про теплотворну здатність ТПВ, залишивши цей сигнал тільки для контролю. Таким чином при спаленні ТПВ динамічні характеристики котла визначаються характеристиками топки.

І навпаки, введення сигналу про теоретичну кількість повітря дозволило збільшити точність підтримання такого складу димових газів, який відповідає мінімальним втратам теплоти від хімічного недопалу та з газами, що відходять. А також за рахунок збільшеної кількості повітря дозволяє зменшити температуру горіння ТПВ в киплячому шарі. Це можна вважати первинним регулюванням температури киплячого шару.

Вторинне регулювання температури шару відбувається за рахунок винесеного трубчастого теплообмінного апарату. Теплообмінні труби занурені в циркулюючу шихту. За рахунок зміни витрати води скрізь цей теплообмінник регулюється температура шихти, що повертається у топку. Така схема регулювання дозволяє підтримувати температуру шихти з більшою точністю в перехідних режимах роботи установки.

4.5.3 Обчислювальний експеримент АСК

Процеси регулювання при нанесенні збурень значенням необхідної потужності та складом ТПВ, показані на рисунках 4.15 – 4.18.

На рисунку 4.15 наведено зміни завдання з навантаження та відповідні змінені значення навантаження установки. Крім того на графіку навантаження в моменти часу 5000 с та 7000 с можна побачити невеликі відхилення, які відповідають нанесенню збурень складом палива у вигляді ТПВ.

Виходячи з графіку, можна зробити висновок, що система керування задовольняє вимогам, щодо підтримання заданого теплового навантаження. Збурення складом паливної суміші компенсуються повністю. Спостерігаються незначні, менш 1 %, відхилення потужності, які повністю компенсуються протягом 2-3 хвилин.

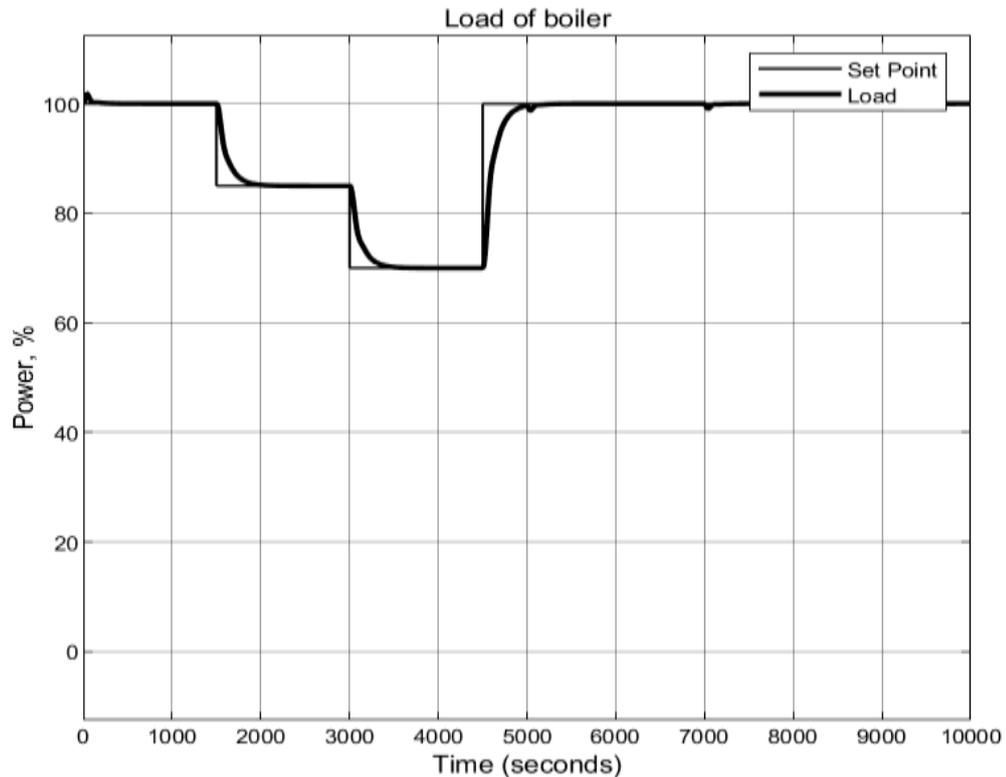


Рисунок 4.15 Графік навантаження установки спалення ТПВ[24]

На рисунку 4.16 наведено перехідний процес регулювання температури киплячого шару. Наведено як відхилення від номінального значення 800 °С, так і абсолютне значення температури шару. Моменти відхилення температури від номінального значення відповідають моментам змінення потужності (1500 с, 3000 с та 4500 с) та моментам змінення складу ТПВ (5000 с та 7000 с).

Виходячи з графіка, можна зробити висновок, що система керування задовольняє вимогам, щодо підтримання температури киплячого шару. При аналізі графіка перехідного процесу варто зазначити, що при однаковому збуренні потужністю в 15 %, але при різних абсолютних значеннях потужності (див. рис. 4.15), величина відхилення температури різна. Це пояснюється нелінійними характеристиками об'єкта керування. Також відрізняється як величина так і форма перехідного процесу при збільшенні потужності.

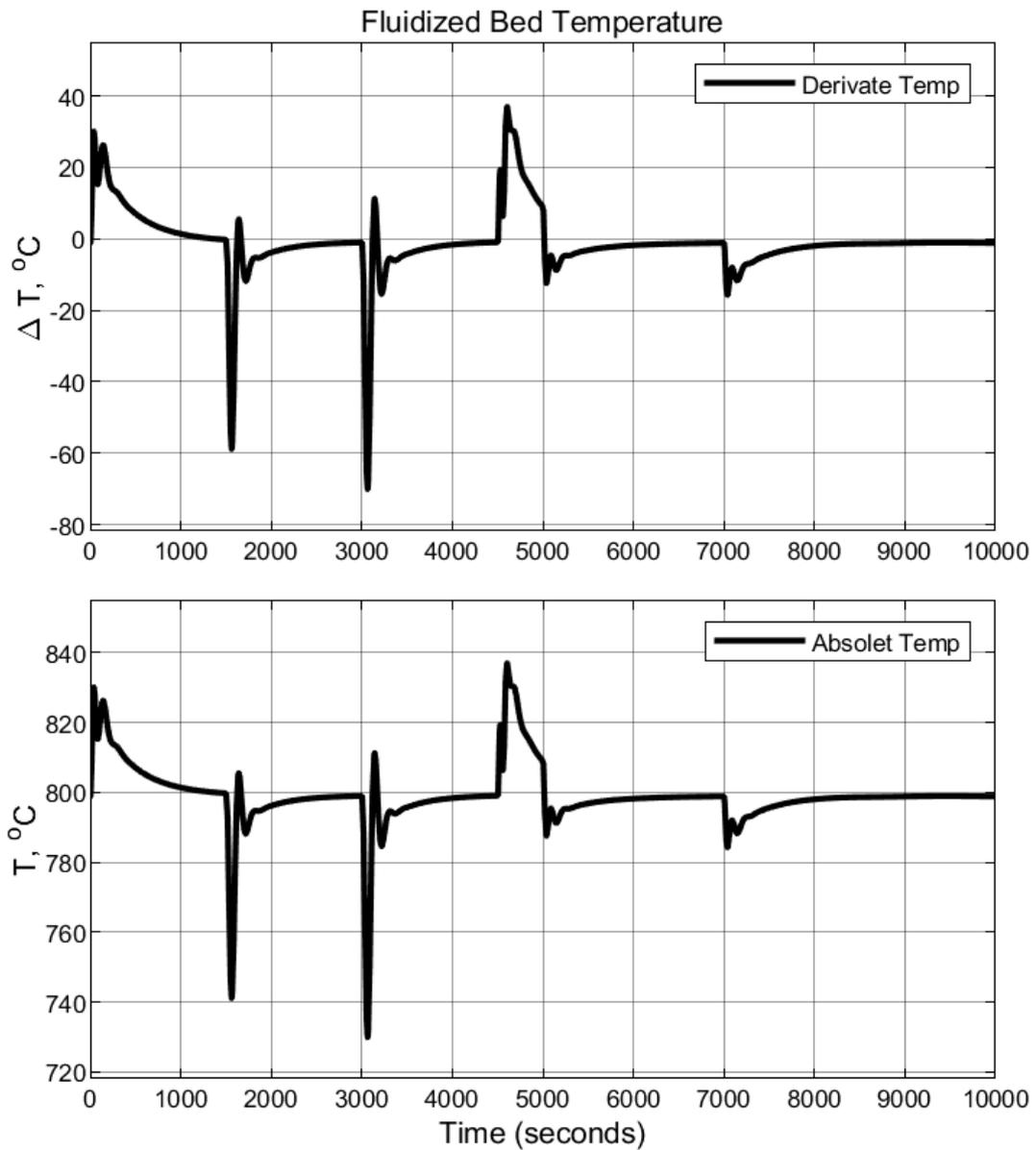


Рисунок 4.16 Перехідний процес регулювання температури киплячого шару[24]

Таким чином якість керування температурою киплячого шару накладає обмеження на величину збурення, яку може компенсувати система керування. Виходячи з результатів імітаційного моделювання рекомендоване не перевищувати величину збурення в 15 % потужності.

На рисунку 4.17 наведені значення витрат паливної суміші, повітря та димових газів.

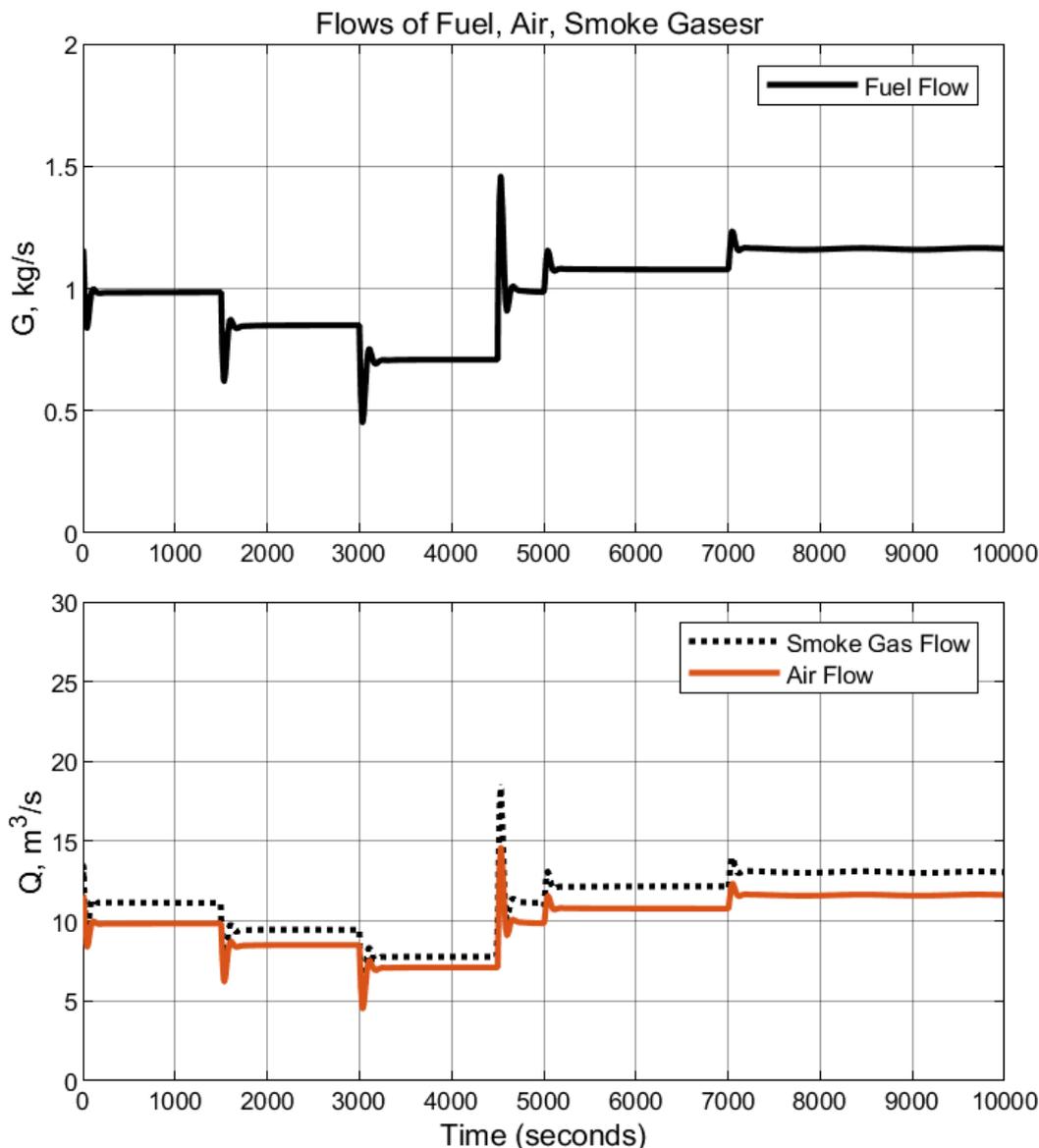


Рисунок 4.17 Графік значень витрат ТПВ, повітря та димових газів[24]

Аналіз графіків показує, що відхилення технологічних параметрів знаходяться в розрахункових межах. Регулюючі органи переміщуються в робочих діапазонах, без виходу на обмеження.

На рисунку 4.18 наведено графіки перехідного процесу регулювання оксидів сірки. На верхньому графіку наведено відхилення концентрації SO_x у димових газах. На нижньому графіку – концентрація сірки в початковій паливній суміші у вигляді ТПВ, яка подається на спалювання.

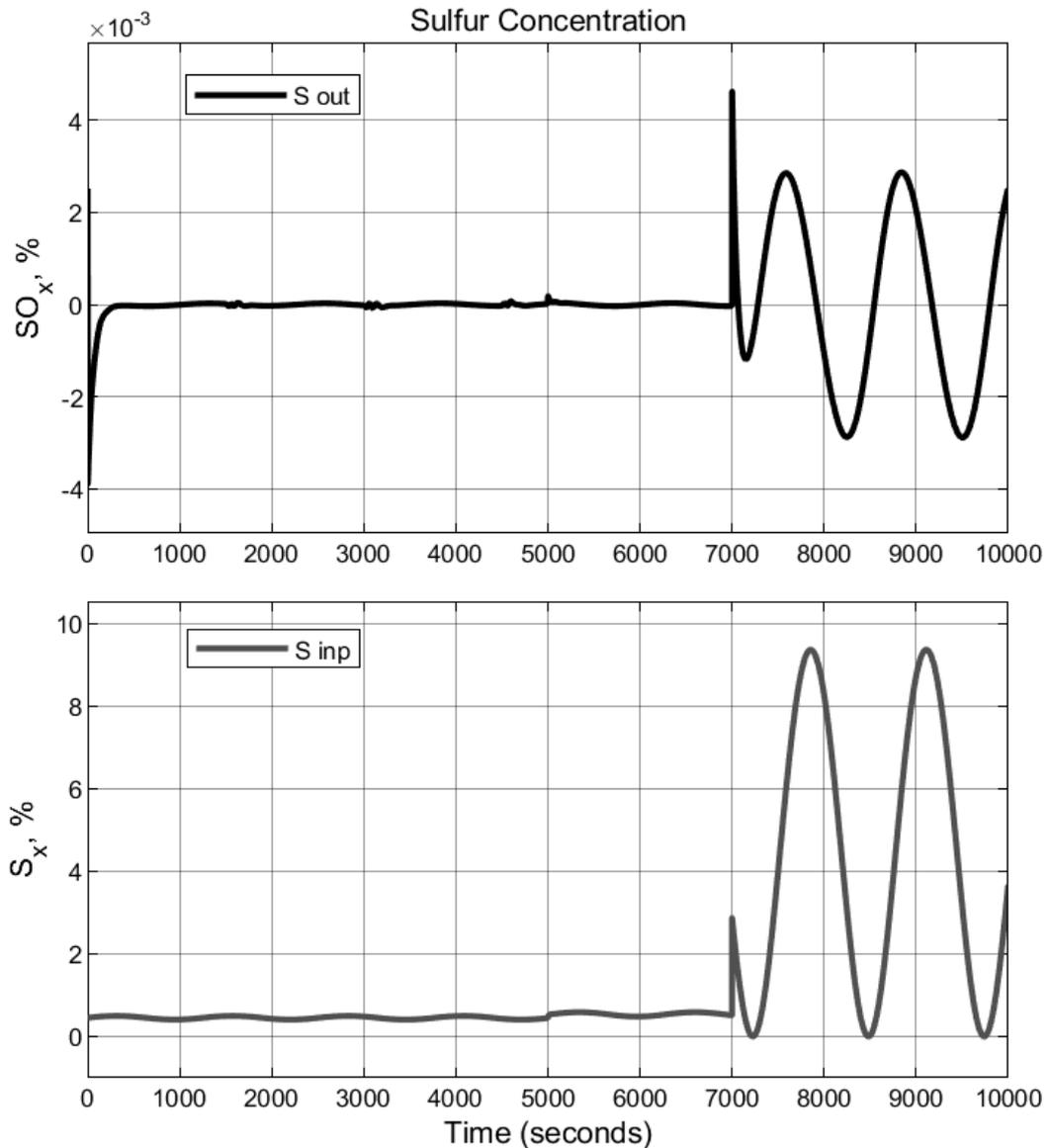


Рисунок 4.18 Графіки перехідного процесу регулювання оксидів сірки[24]

До моменту часу 7000 с моделювалось типове значення концентрації сірки у ТПВ, на рівні 0,5 – 0,8 % до 5000 с та 1 – 1,5 % від 5000 с до 7000 с. Починаючи з 7000 с було змодельоване вміст сірки в складі ТПВ до 10 %. Для типового вмісту сірки концентрація оксиду сірки SO_x у димових газах знаходиться в межах допустимих середньодобових значень $0,05 \text{ мг/м}^3$, для значно збільшеного значення – у межах допустимого разового викиду у $0,5 \text{ мг/м}^3$ [127].

4.6 Висновки до розділу

1. Розглянуто технологію утилізації твердих побутових відходів в установках, що генерують теплову енергію. Обґрунтовано структуру устаткування, що експлуатується при змінному складі палива, а саме ТПВ. Проведено аналіз методів керування навантаженням парових котлів при збуреннях складом ТПВ. При цьому в якості об'єкта керування для подальшого дослідження обрано котел обладнаний топкою з циркулюючим киплячим шаром. Використання ЦКШ дозволяє розв'язати задачу регулювання температури шару з метою зменшення викидів шкідливих сполук сірки та хлору.

2. Проведено декомпозицію установки з виділенням характерних ділянок: топки ЦКШ; винесеного теплообміннику; теплообмінних поверхонь, що нагрівають теплоносій; процес поглинання сполук сірки вапном. Синтезовано математичну модель, яка поєднує окремі математичні ділянки.

3. Синтезовано АСК установкою. При цьому означені регульовані технологічні змінні, керуючі впливи. Виділено чотири основних регулятора, а саме потужності, температури шару, економічності, та викидів шкідливих речовин. Дослідження показали, що визначення бруто формули паливної суміші у вигляді ТПВ дає можливість з випередженням визначити теплотворну здатність палива та визначити теоретичну кількість повітря, яке йде на спалення. Ця інформація використовується для керування навантаженням та економічністю спалення. Однак було прийняте рішення відмовитись від введення в регулятор потужності сигналу про теплотворну здатність палива у вигляді ТПВ, оскільки різка зміна його витрати може призвести до аварійних ситуацій. І навпаки, введення сигналу про теоретичну кількість повітря дозволить збільшити точність підтримання такого складу димових газів, який відповідає мінімальним втратам теплоти від хімічного недопалу та з газами, що відходять. А також збільшення кількості повітря дозволяє зменшити температуру горіння ТПВ в киплячому шарі.

4. Проведено імітаційне моделювання системи. Аналіз перехідних процесів регулювання показав наступне:

– система керування задовольняє вимогам, щодо підтримання заданого теплового навантаження. Збурення складом паливної суміші у вигляді ТПВ компенсуються повністю. Спостерігаються незначні, менш 1 %, відхилення потужності, які повністю компенсуються протягом 2-3 хвилин;

– система керування задовольняє вимогам, щодо підтримання температури киплячого шару. Варто відмітити, що при однаковому збуренні потужністю в 15 %, але при різних абсолютних значеннях потужності, величина відхилення температури різна. Це пояснюється нелінійними характеристиками об'єкта керування. Якість керування температурою киплячого шару накладає обмеження на величину збурення, яку може компенсувати система керування. Виходячи з результатів імітаційного моделювання рекомендоване не перевищувати величину збурення в 15 % потужності;

– для типового вмісту сірки в початковій паливній суміші у вигляді ТПВ (до 1,5 %) концентрація оксиду сірки SO_x у димових газах знаходиться в межах допустимих середньодобових значень $0,05 \text{ мг/м}^3$, для значно збільшеного значення (до 10%) – у межах допустимого разового викиду у $0,5 \text{ мг/м}^3$.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором нові науково обґрунтовані результати, які представлені удосконаленими методами й моделями АСК процесів піролізу та спалювання ТПВ на основі їхнього сортування для підвищення ефективності їхньої утилізації та забезпечення екологічно регламентованих показників. Отримані результати дозволили зробити такі висновки.

Термічна деструкція є ефективною технологією переробки ТПВ, забезпечуючи знешкодження відходів, знищення патогенної мікрофлори, зменшення обсягу відходів та використання енергетичного потенціалу органічних відходів.

Запропоновано розвиток методу класифікації ТПВ та способу їхньої ідентифікації, що дозволяє виділити групи, які утворюють кислі гази. Основою методу є імітаційна модель з таблицею бруто-формул можливих сполук. Ідентифікація сполук здійснюється термохімічним способом.

Розроблено метод сортування ТПВ для подальшої ефективної переробки з дотриманням екологічних показників. Метод включає технологічний спосіб сортування, інтеграцію вимірювальних пристроїв та принцип їхнього застосування залежно від задачі ідентифікації.

Запропоновано імітаційну модель процесу очищення для переробки ТПВ методами термічної деструкції з отриманням вуглецевих газів. Розрахунок ефективності термічної деструкції різних груп ТПВ є критерієм вибору між спалюванням та піролізом.

Сформульовано правило прийняття рішення для вибору способу переробки ТПВ з дотриманням екологічних норм. Розроблено структуру технічних засобів та комплексну технологічну схему термічної деструкції.

Розглянуто особливості роботи та завдання керування піролізною установкою для термічної деструкції ТПВ. Розроблено метод нечіткого керування процесом піролізу ТПВ змінного складу та вологості, що забезпечує

автоматизоване керування установкою з оптимальним співвідношенням витрати повітря/ТПВ. Створено структуру системи автоматизованого керування та нечітку підсистему визначення оптимальних параметрів процесу піролізу. Дослідження підтвердили високу ефективність методу нечіткого керування, що дозволяє стабілізувати температуру та рівень в газгольдері, забезпечуючи виробництво піролізного газу з оптимальною теплотворною здатністю.

На основі аналізу установок, що генерують теплову енергію для утилізації ТПВ, обґрунтовано структуру обладнання та вибір котла з ЦКШ для дослідження. Регулювання температури шару дозволяє зменшити викиди шкідливих сполук. Проведено декомпозицію установки, виділено основні ділянки та створено математичну модель. Розроблено АСК, яка включає чотири основні регулятори (потужності, температури шару, економічності, викидів шкідливих речовин) та дозволяє компенсувати вплив змінного складу паливної суміші. Імітаційне моделювання показало, що система задовольняє вимогам щодо підтримки теплового навантаження та температури, забезпечуючи стабільну роботу та екологічну безпеку процесу.

Результати роботи впроваджено в тематиці ТОВ «КОНКРИТ-СИСТЕМС» Також матеріали дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес Національного університету «Одеська політехніка» кафедри програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій в дисциплінах «Моделювання процесів і систем», «Автоматизація виробничих процесів», «Сучасні системи керування», «Оптимальні та адаптивні системи управління».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Економічна правда.
URL:<https://epravda.com.ua/publications/2023/06/19/701281/> (дата звернення: 04.12.24).
2. Управління відходами руйнації війни в Україні. Актуальні практики та необхідні зміни. URL:https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2024/04/dodatok_1_zvit_vidhody_rujnacziyi_vijny.pdf /(дата звернення: 04.12.24)
3. Екологія право людина. Стан поводження з відходами від руйнувань в Україні станом на квітень 2024 року. URL:<https://epl.org.ua/announces/stan-povodzhennya-z-vidhodamy-vid-rujnuvan-v-ukrayini-stanom-na-kviten-2024-roku/> (дата звернення: 04.12.24)
4. Децентралізація. Управління відходами під час дії воєнного стану: поради для громад(інфонографіка). URL:<https://decentralization.ua/news/15644> (дата звернення: 04.12.24)
5. Екополтава. «Відходи та війна»: Екополтава провела нове аналітичне дослідження. URL:<https://www.ekoltava.org/2023/09/05/vidhody-ta-vijna-ekoltava-provela-nove-analitychne-doslidzhennya> (дата звернення: 04.12.24)
6. Ecobusiness group. Платформа рішень для менеджерів природоохоронної діяльності. URL:<https://ecolog-ua.com/news/yaki-novi-umovy-povodzhennya-z-vidhodamy-dyktuye-povnomasshtabna-agresiya-v-ukrayini>
7. Управління відходами руйнації війни в Україні. Актуальні практики та необхідні зміни. 2024. URL:https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2024/04/dodatok_1_zvit_vidhody_rujnacziyi_vijny.pdf (дата звернення: 06.12.24).
8. Brunetkin O., Davydov V., Butenko O., Lysiuk G., Bondarenko A. Determining the composition of burned gas using the method of constraints as a problem of model interpretation. Eastern-European Journal of Enterprise

Technologies. 2019. Vol. 3, N 6 (99). P. 22-30.
URL:<https://journals.uran.ua/eejet/article/view/169219> (SCOPUS)

9. Lysiuk H., Maksymova O. Model and method of solid household waste sorting for their effective thermal disposal. Energy Engineering and Control Systems. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 31 – 46. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2023.01.031>

10. Davydov V., Brunetkin V., Lysiuk G. Solution of the Inverse Incorrectly Posed Problem by the Library Method. Proceedings of the 12th International Conference on Applied Innovations in IT (ICAИТ), March 2024 Volume 12, Issue 1. P. 97-103. SCOPUS ISSN 2199-8876 DOI: <http://dx.doi.org/10.25673/115729> (SCOPUS)

11. Лисюк Г.П., Белов В.О., Рябошапка Р.М., Торопенко О.В. Метод сортування твердих побутових відходів для їх ефективної термічної утилізації. III Міжнародна науково-практична конференція «Science in the modern world: innovations and challenges». Торонто, Канада. 2024. С.281-287. URL:https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/SCIENCE-IN-THE-MODERN-WORLD-INNOVATIONS-AND-CHALLENGES-21-23.nov_.24.pdf

12. Maksymova O.B., Lysiuk H.P., Zhanko K.O., Bessarab V.P. Model and method of decision-making rules for the formation of the structure of technical equipment in processes of thermal destruction of msw in the normation of acid gases emissions. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2024. № 39(115). С.42-54. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.39.115.2024.5>

13. Лисюк Г.П., Сухань Р.В., Хирний В.І., Чебаненко М.О. Метод розрахунку витрат на забезпечення термічної утилізації твердих побутових відходів з дотриманням екологічних нормативів. IV Міжнародна науково-практична конференція «Science and technology: challenges, prospects and innovations». Осака, Японія. 2024. С.261-266. URL:<https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-CHALLENGES-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-28-30.11.24.pdf>

14. Oleksiy Kozlov, Yuriy Kondratenko, Hanna Lysiuk, Viktoriia Kryvda, Oksana Maksymova. Fuzzy Automatic Control of the Pyrolysis Process for the Municipal Solid Waste of Variable Composition . Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems. 2022. Vol.16, N° 1. P. 83-94. DOI:10.14313/JAMRIS/1-2022/9

URL:<https://sciendo.com/pl/article/10.14313/jamris/1-2022/9> (SCOPUS)

15. Лисюк Г. П. Лінник О.О., Лесів Б.І., Горалік О. Є. Метод нечіткого керування процесом піролізу твердих побутових відходів змінного складу. I Міжнародна науково-практична конференція «Future of science: innovations and perspectives». Стокгольм, Швеція. 2024. С. 265-269. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/FUTURE-OF-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PERSPECTIVES-25-27.11.24.pdf>

16. Лисюк Г. П., Арику І. В., Соколюк С. О. Нечітка підсистема визначення оптимальних параметрів процесу піролізу. XIII Міжнародна науковопрактична конференція «Innovations in modern education: European and global context». Краків, Польща. 2024. С. 308-310. URL:<https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2024/10/INNOVATIONS-IN-MODERN-EDUCATION-EUROPEAN-AND-GLOBAL-CONTEXT.pdf>

17. Петік Т.В., Лисюк Г.П. Автоматична система регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку 1000 МВт атомної електричної станції. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30 (69), Ч. 2, №3. С.7–13. DOI:<https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/02> URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_2/4.pdf

18. Lysiuk H., Filippov Y., Panin V. Justification of equipment structure for solid municipal waste incineration. Grail of science. 2024. №47. P. 461–466. DOI:<https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.12.2024.061> <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/20.12.2024/35>

19. Сичило А.А., Беглов К.В., Лисюк Г.П. Моделювання АСР потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 в режимі «Т». Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30 (69), Ч. 1 № 3. С. 158 – 163. DOI:<https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/29>

URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/3-1_2019.pdf

20. Терлецький В.О., Лисюк Г.П. Моделювання АСР температури пару за редуційно-охолоджуваль ною установкою енергоблоку АЕС ВВЕР 1000 МВт. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30(69), Ч.1 № 3. С. 170-174. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/31>

URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/33.pdf

21. Hanna Lysiuk, Serhii Sokoliuk, Oleksandr Solohub, Yevhenii Stafidov. Research on methods to reduce harmful emissions during the combustion of solid municipal waste in circulating fluidized bed furnaces. Modern engineering and innovative technologies. 2024. №36, Part 2, P.77-83. DOI:10.30890/2567-5273.2024-36-00-013

URL:<https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit36-02/meit36-02>

22. Чернофостова К.В., Лисюк Г.П. Підвищення якості регулювання рівня в баці деаератора енергоблоку АЕС із ВВЕР-1000. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30 (69), Ч. 1 № 3. С. 200– 205. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/36> URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/38.pdf

23. Сичило А.А., Беглов К.В., Лисюк Г.П. Розробка АСК потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 в режимі «Т» (частина 2). Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. 2020. Том

31 (70), Ч. 1 № 2. С.181-186. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/28>

24. Лисюк Г.П. Синтез системи управління тепловим навантаженням барабанного котла при спалюванні твердих побутових відходів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35 (74), № 5. С.178–187. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/27>

25. Лисюк Г.П., Бабенко О.В., Захаров Ю.Ф., Мітяєв В.Б., Попов О.Ю. Удосконалення математичної моделі спалювання твердого палива змінного складу в топках з циркулюючим киплячим шаром. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Cultural and artistic processes in the context of the European scientific space». Валенсія, Іспанія. 2024. С.337-341. URL: <https://isg-konf.com/uk/cultural-and-artistic-processes-in-the-context-of-the-european-scientific-space/>

26. Лисюк Г.П., Скліфасовський Д. Є., Сологуб О. В., Стафідов Є. Б. Ефективність та керування термічною утилізацією твердих побутових відходів у топках із киплячим шаром. XLIX Міжнародна науково-практична конференція «New Areas of Scientific Research: Exploring New Frontiers». Неаполь, Італія. 2024. С.38- 43. URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/11/New_areas_of_scientific_research_exploring_new_frontiers_November_27-29_2024_Naples_Italy.pdf

27. Рибалова О.В. Поводження з відходами: Курс лекцій. Для студентів денної форми навчання. Спеціальність 101 Екологія Освітньо-кваліфікаційний ступінь магістр. Х: НУЦЗУ, 2016. 530 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/5280/1/%D0%9F%D0%9E%D0%92%D0%9E%D0%94%D0%96%D0%95%D0%9D%D0%9D%D0%AF%20%D0%97%20%D0%92%D0%86%D0%94%D0%A5%D0%9E%D0%94%D0%90%D0%9C%D0%98.pdf>

28. Каратєєва О. І., Коваль О. А., Гроза В. І. Технологія переробки побутових відходів та відходів сільського господарства : курс лекцій для здобувачів вищої освіти ступеня «бакалавр» спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» - Миколаїв: МНАУ, 2018. 190 с.
URL:<https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4379/1/Tekhnolohiia%20pererobky%20pobutovykh%20vidkhodiv.pdf>

29. Браверман В.Я., Власюк В.В. Очищення та переробка відходів. Технології утилізації твердих побутових відходів як джерело отримання альтернативних енергетичних ресурсів на прикладі Одеської області. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2017. № 1. С. 54-59.
URL:<http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/159190>

30. Севостьянов І. В. Дослідження обладнання для спалювання відходів харчових виробництв. Наукові праці ВНТУ. 2015. №3.
URL:<https://trudy.vntu.edu.ua/index.php/trudy/article/view/8>

31. Senchuk M. Розподілення вторинного повітря в технологічній схемі спалювання твердого палива в шарі. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2020. Том 32. С. 24-33.
URL:<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2020.0.24-33>

32. Кучін Г.П., Скрипко В.Я., Сігал А.І., Бікоріз Є.І. Перспективи спалювання низькосортного твердого палива у топках киплячої кулі опалювальних котлів потужністю до 1 мВт. Пром. Теплотехніка. 2009. Т. 31 №4. С.51-55.
URL:<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60911/08-Kuchin.pdf?sequence=1>

33. Чепурний М. М., Куцак О. В., Димніч І. М. Порівняння енергоефективності систем теплопостачання від опалювальних котелень і теплонасосних установок. НаукПраці ВНТУ, вип. 4. 2012.
URL:<https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/294>

34. Конспект лекцій з дисципліни «Пічне обладнання у хімічних процесах» для студентів напряму 6.050503 Машинобудування: [Електронний

ресурс]: НТУУ КПІ; уклад, А.Р. Степанюк. Київ: НТУУ КПІ. 2016. 132 с.
URL:<https://core.ac.uk/download/pdf/47235382.pdf>

35. Васильєв І.В., Капустенко П.О., Перевертайленко О.Ю., Ілюнін О.О., Бухкало С.І., Арсеньєва О.П. Проблеми та перспективи деяких сучасних технологій термічної конверсії твердих побутових відходів. Інтегровані технології та енергозбереження. 2013. №2.
URL:http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/ite_2013_2_vasilyev.pdf

36. Сметанюк Є.К., Боглаєнко Д.В., Шапурев В.П. Реакторна система переробки твердих побутових відходів на основі методу сухого високотемпературного піролізу та особливості перебігу процесу у газифікаторі. Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. тр. Темат. вип . : Хімія, хімічна технологія та екологія. – Харків: НТУ "ХПІ". 2006. № 43. С. 3-22.
URL:<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/37938>

37. Козій О.І., Петрук М.П., Вахула О.М. Термічне знешкодження твердих побутових відходів: Європейський досвід. Комунальне господарство міст. 2015. випуск 120 (1)
URL:<https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/download/4855/4813>

38. Синяговська К. В. Біотермічна ферментація відходів. Збірка тез доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Екологія. Людина. Суспільство». м. Київ, Україна, 2015 р. URL:<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/1a39f041-c764-4396-9fd4-2918109f09b7/content>

39. Скляр О.Г., Скляр Р.В. Біотермічна твердофазна ферментація гною. Праці ТДАТА. Мелітополь. 2008. Вип. 8. Т.3. С. 145-150.
URL:<http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/201/1/85.pdf>

40. Коваленко І.В., Кузнецова І.О., Шевченко Р.І., Гаркович О.Л. Поводження з муніципальними відходами: навч. посібн. для студ. закладів вищої освіти. Одеса : ОНАХТ «Академія». 2018. 150 с. URL:<https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/8fd9d8ed-164f-451e-8aa4-b57f49375329/content>

41. Самойчук К.О., Верхоланцева В.О., Лівик Н.В. Використання енергії вітру та біопалива в машинобудівній галузі промисловості. Електронний навчальний посібник. 2020 р.
URL:https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_4/index.html

42. Guizani C. et al. Biomass Chars: The Effects of Pyrolysis Conditions on Their Morphology, Structure, Chemical Properties and Reactivity. *Energies*. 2017. 10(6). DOI:<https://doi.org/10.3390/en10060796>

43. Кондратенко Ю. П., Козлов О. В. Поліметрична комп'ютеризована система моніторингу та автоматичного управління рівнем завантаженості піролізного реактора комплексу екопірогенезису. Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили. Сер. : Комп'ютерні технології . 2013. Т. 213, Віп. 201. С. 45-50.
URL:http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchduct_2013_213_201_9

44. Кондратенко Ю. П., Козлов О. В. Нечіткі регулятори в системах управління реакторами багатоконтурних піролізних установок. Проблеми інформаційних технологій. 2012. № 1. С. 20-28.
URL:http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pit_2012_1_5

45. Борін В. С., Головач І. Р., Ікалюк О. А. Розробка автоматизованої системи управління технологічним процесом виробництва етилену. Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ, 2022. №2 (49). С. 58-65.
URL:<https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/download/593/585>

46. Максименко А. Розробка системи управління для того, щоб піролісис поєднується з сільськогосподарським комплексом з застосуванням фузійної логіки. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. 4 (2 (60)). С. 16-21. DOI: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.237762>

47. Шувалов Д.Р. Автоматизована система регулювання печі для спалювання органічних відходів. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. 2021. Том 32 (71), № 5. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/24>
https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/5_2021/26.pdf

48. Lukas Böhler, Jürgen Krail, Gregor Görtler, Martin Kozek. Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces. *Applied Energy*. 2020. Vol. 276 , 15.

URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920308515?via%3Dihub>

49. Lucas Böhler, Markus Fallmann, Gregor Görtler, Jürgen Krail, Florian Schittl, Martin Kozek. Emission limited model predictive control of a small-scale biomass furnace. *Applied Energy*. 2021. Vol. 285. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116414>

50. Gómez MA, Porteiro J., Chapela S., Míguez JL. An Eulerian model для simulation of thermal conversion of single large biomass particle. *Fuel*. 2018. Vol. 220. P. 671-681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.063>

51. Pál Tóth, Attila Garami, Bernadett Csordás. Image-based deep neural network prediction of heat output of step-grate biomass boiler. *Applied Energy*. 2017. Vol. 200. P. 155-169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.080>

52. Chenchen Zhou, Yi Cao, Shuanghua Yang. Video Based Combustion State Identification for Municipal Solid Waste Incineration. *IFAC-PapersOnLine* . 2020. Vol. 53, Issue 2. P. 13448-13453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.255>

53. Bai X., Lu G., Hossain M., Szuh'anszki J., Daood S., Nimmo W., Yan Y., Pourkashanian M. Multi-mode combustion процесси monitoring on pulverised fuel combustion test facility based on flame imaging and random weight network techniques. *Fuel*. 2017. 202. P. 656-664. URL: <https://eprints.whiterose.ac.uk/115725/>

54. Chen, J., Hsu, TY., Chen, CC., Cheng, YC. Online Predictive Monitoring Using Dynamic Imaging of Furnaces with the Combinational Method of Multiway Principal Component Analysis and Hidden Markov Model. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. 50 (5). P. 2946-2958. DOI:10.1021/ie100671j URL:https://www.researchgate.net/publication/231376031_Online_Predictive_Monitoring_Using_Dynamic_Imaging_of_Furnaces_with_the_Combinational_Method_of_Multiway_Principal_Component_Analysis_and_Hidden_Markov_Model

55. Zhezhe Han Jian Li et al. Prediction of combustion state через semi-supervised learning model and flame imaging. Elsevier Science. 2020. DOI: 10.1016/J.FUEL.2020.119745

56. James Cugley , Gang Lu , Yong Yan , Ivan Searle. Flame monitoring i characterisation через digital imaging and spectrometry. Institute of Measurement and Control. 2018. URL: <https://core.ac.uk/display/189721463?source=2>

57. Gang Lu, Yong Yan, Mike Colechin. A Digital Imaging Based Multifunctional Flame Monitoring System. Ieee Transactions On Instrumentation And Measurement. 2004. Vol. 53, No. 4. URL: https://web.archive.org/web/20040915021036id_/http://www.ee.kent.ac.uk:80/~yy/Papers/IEEE_IM_flame_2004.pdf

58. Yueyue Xia, Jiakai Zhang, Congwei Tang, Weiguo Pan. Research and application of online monitoring of coal and biomass co-combustion and biomass combustion characteristics based on combustion flame. Journal of the Energy Institute. 2023. Vol. 108. 101191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101191>

59. Song Jingge, Carlos E. Romero, Yao Zheng, He Boshu. Globally active general neural network regression on-line multiple emission prediction of utility boiler. Knowledge-Based Systems. 2017. Vol. 118. P. 4-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.11.003>

60. Максимов М.В., Демиденко В.Є., Бутенко О.В., Брунеткін О.І. Модель піролізу органічних речовин змінного складу. Інтегровані технології та енергозбереження. 2020. №3. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.3.02

61. Установка визначення складу горючого газу в процесі його спалювання. Патент України на винахід №. 120216: МПК G01N 7/08 (2006.01), G01N 25/20 (2006.01) / Максимов М.В., Брунеткін О.І., Лісюк О.В., Тарахтій О.С. №а 2017 12785; заявл. 22.12.2017; опубл. 25.10.2019, Бюл. N 20.

62. Xiaoqiang Wen, Kaichuang Li, Jianguo Wang. NO x emission predicting for coal-fired boilers based on ensemble learning methods and optimized base learners. Energy. 2023. Vol. 264. 126171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126171>

63. Xiaosong Ding, Chong Feng, Peiling Yu, Kaiwen Li, Xi Chen. Gradient boosting decision tree on the prediction of NO_x emission of waste incineration. *Energy*. 2023. Vol. 264. 126174. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126174>
64. Huirong Zhao, Jiong Shen, Yiguo Li, Joseph Bentsman. Coal-fired utility boiler modelling for advanced economical low-NO_x combustion controller design. *Control Engineering Practice*. 2017. Vol. 58. P. 127-141. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.10.005>
65. Carroll JP, Finnan JM, Biedermann F., Brunner, Obernberger I. Air staging to reduce emissions from energy crop combustion in small scale applications. *Fuel*. 2015. Vol. 155. P. 37-43. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.008>
66. Hartmut Mätzing, Hans-Joachim Gehrman, Helmut Seifert, Dieter Stapf. Modelling grate combustion of biomass and low rank fuels with CFD application. *Waste Management*. 2018. Vol. 78. P. 686-697. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.008>
67. Striūgas N., Vorotinskienė L., Paulauskas R., Navakas R., Džiugys A., Narbutas L. Estimating the fuel moisture content to control the reciprocating grate furnace firing wet woody biomass. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 149. P. 937-949. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.014>
68. Yize Li, Rohit Gupta, Siming You. Machine learning assisted prediction of biochar yield and composition via pyrolysis of biomass. *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 359. 127511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127511>
69. Sikan Wu, Yongyi Song, Xin Wang, Jie Xu, Bin Xiao, Kai Qiao. Simulation and optimization of heating rate and thermal uniformity of microwave reactor for biomass pyrolysis. *Chemical Engineering Science*. 2022. Vol. 250. 117386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117386>
70. Пелих С.Н., Максимов М.В., Нікольський М.В. Метод мінімізації ймовірності накопичення параметрів руйнування оболонок у тепловиділяючих елементах ВВЕР. *Проблеми атомної науки і техніки*. 2024. 92(4). С. 108-116.

71. Пелих С.Н., Максимов М.В. Метод контролю перегрупування палива з урахуванням пошкодження та вигорання оболонок ТВЕ. Проблеми атомної науки і техніки. 2013. 87(5). С. 84-90.

72. Максимов М.В., Пелих С.Н., Гонтарь Р.Л. Принципи керування ресурсом оболонок ТВЕЛ у змінних режимах навантаження ВВЕР-1000. Атомна енергетика 2012. 112(4), С. 241-249. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10512-012-9552-3>

73. Козлов О., Кондратенко Г., Гомолка З., Кондратенко Ю. та ін. Синтез та оптимізація зелених нечітких регуляторів для реакторів спеціалізованих піролізних установок. Зелена IT-інженерія: Соціальні, ділові та промислові додатки, Дослідження систем, прийняття рішень і управління. Springer, Cham. 2019. Том 171. С. 373-396. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_16

74. Кондратенко Ю.П., Козлов О.В., Коробко О.В. та ін. Дві модифікації автоматичного синтезу бази правил для нечітких систем керування та прийняття рішень. Обробка інформації та управління невизначеністю в системах, заснованих на знаннях: теорія та основи, 17-та міжнародна конференція, IPMU 2018, Кадіс, Іспанія, матеріали, частина II, CCIS 854, Springer International Publishing AG. 2018. С.570-582. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-319-91476-3_47

75. Кондратенко Ю.П., Козлов А.В. Генерація баз правил нечітких систем на основі модифікованих алгоритмів Ant Colony. Журнал автоматизації та інформаційних наук. Нью-Йорк: Begel House Inc. 2019. Том. 51, випуск 3, С.4-25. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v51.i3.20

76. Jamshidi M., Kreinovich V., Kasprzyk J., Eds. Advance Trends in Soft Computing. Cham: Springer-Verlag. 2013. DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03674-8>

77. Кондратенко Ю.П., Коробко О.В., Козлов О.В., Синтез та оптимізація нечіткого контролера для термоакустичної установки, Лотфі А. Заде та ін. (Ред.) Останні розробки та нові напрямки в основах і програмах м'яких обчислень, Дослідження нечіткості та м'яких обчислень. Берлін, Гейдельберг:

Springer-Verlag. 2016. Том. 342. С. 453-467. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-319-32229-2_31

78. Дж. Чжао та ін. Нечітке ПД-регулювання, оптимізоване за допомогою генетичного алгоритму для відстеження траєкторії руки робота. 12-й Всесвітній конгрес з інтелектуального керування та автоматизації (WCICA). 2016. Гуйлінь, Китай, С. 556-559. DOI: 10.1109/WCICA.2016.7578443

79. Каспрзык J. Багатоступеневе нечітке керування: наказовий підхід. John Wiley & Sons, Inc., Нью-Йорк, США, 1997.

80. Witold Pedrycz, Kuwen Li, Marek Reformat. Evolutionary Reduction of Fuzzy Rule-Based Models. Fifty Years of Fuzzy Logic and its Applications. STUDFUZ 326, Cham: Springer. 2015. P.459-481. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-319-19683-1_23

81. Ben N., Bouallègue S., Haggège J. Fuzzy gains-scheduling of an integral sliding mode controller for a quadrotor unmanned aerial vehicle, Int. J. Adv. Computer Sci. Appl. 2018. Vol. 9, № 3. P. 132-141. DOI: 10.14569/IJACSA.2018.090320

82. Ghosh D., Bandyopadhyay SK, Taki GS. Green Energy Harvesting from Waste Plastic Materials by Solar Driven Microwave Pyrolysis. 2020 4th International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech). 2020. P.1-4. DOI: 10.1109/IEMENTech51367.2020.9270122.

83. Боулз А. Дж., Фаулер Г. Д. Оцінка впливу сировини та контролю процесу на результати піролізу для переробки шин. Ресурси, збереження та переробка. 2022. Том. 182, 106277. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106277>

84. Biao Zhang, Dong-lai Xu, Yuan Liu. Automatic control system of biomass pyrolysis gas carbon compound furnace based on PLC. 2020 3-rd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM). 2020. P. 435-442. DOI: 10.1109/WCMEIM52463.2020.00098.

85. Кондратенко Ю.П., Козлов О.В., Герасін О.С., Топалов А.М., Коробко О.В. Автоматизація процесів керування в спеціалізованих піролізних комплексах на базі систем Web SCADA. Інтелектуальні системи збору даних та передові обчислювальні системи: Технологія та застосування (IDAACS): Зб. 9-ї міжнародної конференції IEEE. Бухарест, Румунія. 2017. Том 1. С. 107-112. DOI: 10.1109/IDACS.2017.8095059

86. Z. Fu, J. Wang і C. Yang. Research on the simulation of the heat transfer function of the kettle of the gasification reaction of pyrolysis of plastic waste 2017 China Automation Congress (CAC). 2017. P. 2698-2701. DOI: 10.1109/CAC.2017.8243233.

87. Кондратенко Ю.П., Козлов О.В. Математичне моделювання температурного режиму реактора багатоконтурної піролізної установки. Моделювання та моделювання в техніці, економіці та менеджменті. Конспект лекцій з обробки бізнес-інформації. 2012. Вип. 115. С. 178-187. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-642-30433-0_18

88. Hofmann J., Holz H., Gröll L. Relative Gain Array and Singular Values Analysis to Improve the Control in a Biomass Pyrolysis Process, 2019 IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). 2019. P. 596 -603, DOI: 10.1109/ICCA.2019.8900025

89. Тунцев Д.В. та ін. Математична модель швидкого піролізу деревних відходів. Міжнародна конференція з машинобудування, автоматизації та систем управління (MEACS). 2015. С. 1-4, DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414929.

90. Кондратенко Ю.П., Козлов О.В., Клименко Л.П., Кондратенко Г.В. Синтез і дослідження нейро-нечіткої моделі екопірогенозової багатоциркуляторної системи кровообігу, Передові тенденції в м'яких обчисленнях, Дослідження нечіткості та м'яких обчислень, Берлін, Гейдельберг: Springer-Verlag. 2014. Vol. 312. P. 1 - 14. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-319-03674-8_1

91. Кондратенко Ю.П., Козлов О.В. Математична модель реактора екопірогенозу з нечіткою параметричною ідентифікацією, Останні розробки

та нові напрямки в основах і додатках м'яких обчислень, Дослідження нечіткості та м'яких обчислень, том. 342, Lotfi A. Zadeh та ін. (Ред.). Берлін, Гейдельберг: Springer-Verlag. 2016. С. 439-451. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-319-32229-2_30

92. Тудор Ф. С., Боангіу Ф. М., Петреску К. Контролер першого порядку для нафтохімічного піролізного реактора, 2-га Міжнародна конференція з систем і комп'ютерних наук. 2013 С. 20-25, DOI: 10.1109/IcConSCS.2013.6632017

93. Bu Q. The effect of fuzzy PID temperature control on the analysis of thermal behavior and kinetics of microwave pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021. Vol. 158. 105176. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105176>

94. Liu X., Wang S., Xing L. Fuzzy self-tuning PID temperature control for biomass pyrolysis fluidized bed combustor. 2010 2-nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering. 2010. P. 384-387. DOI: 10.1109/ICIME.2010.5477837.

95. Mircioiu M., Cimpoeșu E.-M., Dimon C. Robust control and optimization for a petrochemical pyrolysis reactor. 18-th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'10. 2010. P. 1097-1102. DOI: 10.1109/MED.2010.5547645.

96. Крістіна П., Александру П. Покращення продуктивності заводу FCC за допомогою адаптивного керування еталонною моделлю на основі нейронної мережі, 2016, 8-ма Міжнародна конференція з електроніки, комп'ютерів та штучного інтелекту (ECAI). 2016. С. 1-4. DOI: 10.1109/ECAI.2016.7861074.

97. Попеску Д., Петреску К., Дімон К., Боангіу М. Керування та оптимізація для нафтохімічного реактора, 2-га Міжнародна конференція з систем та комп'ютерних наук. 2013. С. 14-19. DOI: 10.1109/IcConSCS.2013.6632016.

98. Christoph Schörghuber, Markus Gölles, Markus Reichhartinger, Martin Horn. Control biomass grate boilers using internal model control. *Control*

Engineering Practice. 2020. Vol. 96. 104274.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.104274>

99. Robert Bauer, Markus Göllles, Thomas Brunner, Nicolaos Dourdoumas, Ingwald Obernberger. Modelling of grate combustion in medium scale biomass furnace for control purposes. *Biomass and Bioenergy*. 2010. Vol. 34, Issue 4. P. 417-427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.12.005>

100. Markus Göllles, Stefan Reiter, Thomas Brunner, Nicolaos Dourdoumas, Ingwald Obernberger. Model based control of small-scale biomass boiler. *Control Engineering Practice*. 2014. Vol. 22. P. 94-102.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.09.012>

101. Вн Lv, Feng Hong, Tingting Yang, Fang Fang, Jizhen Liu. A dynamic model for the bed temperature prediction of circulating fluidized bed boilers based on least squares support vector machine with real operational data. *Energy*. 2017. Vol. 124. P. 284-294. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.031>

102. Hongguang Pan, Weimin Zhong, Zaiying Wang, Guoxin Wang. Optimization of industrial boiler combustion control system based on genetic algorithm. *Computers & Electrical Engineering*. 2018. Vol. 70. P. 987-997. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.03.003>

103. Haixu Ding, Jian Tang, Junfei Qiao. MIMO modeling i multi-loop control based on neural network for municipal solid waste incineration. *Control Engineering Practice*. 2022. Vol. 127. 105280.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105280>

104. Jingge Song, Carlos E. Romero, Zheng Yao, Boshu He. Improved artificial bee colony-based optimization of boiler combustion considering NO_x emissions, heat rate and fly ash recycling for on-line applications. *Fuel*. 2016. Vol. 172. P. 20-28. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.065>

105. Gómez M.A., Porteiro J., de la Cuesta D., Patiño D., Míguez J.L. Numerical simulation of the combustion process of a pellet-drop-feed boiler. *Fuel*. 2016. Vol. 184. P. 987-999. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.082>

106. Zihong Xia, Jisheng Long, Shuai Yan, Li Bai, Hailiang Du, Caixia Chen. Two-fluid simulation of moving grate waste incinerator: Comparison of 2D and 3D bed models. *Energy*. 2021. Vol. 216. 119257. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119257>
107. Yan Shi, Wenqi Zhong, Xi Chen, AB Yu, Jie Li. Combustion optimization of ultra supercritical boiler based on artificial intelligence. *Energy* . 2019. Vol. 170. P. 804-817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.172>
108. Максимов М.В., Брунеткін О.І., Максименко О.О., Лісюк О.В. Математична модель визначення складу суміші вуглеводневих кисневмісних газів палива, що спалюється. Вчені записки таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського, Серія "Технічні науки". 2018. Том 29 (68) № 1. С.77-84. URL:http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2018_29_1%282%29__17
109. Брунеткін О.І., Максимов М.В. Метод визначення складу горючих газів при їх спалюванні. Науковий вісник НГУ. 2015. №5. С. 83-90. URL:http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2015_5_16
110. Глушко В.П. Термодинамічні та теплофізичні властивості продуктів згоряння: справ. АН СРСР, ВІНІТІ, Т. 1, 266, 1972.
111. Brunetkin O., Maksymov M.V., Maksymenko A., Maksymov M.M. Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. №4(6), P. 25-31. DOI:10.15587/1729-4061.2019.17642https://www.researchgate.net/publication/336172793_Development_of_the_unified_model_for_identification_of_composition_of_products_from_incineration_gasification_and_slow_pyrolysis
112. Maksymov M. V., Brunetkin O. I., Beglov K.V., Alyokhina S.V., Butenko O.V. Automatic Control for the Slow Pyrolysis of Organic Materials with Variable Composition. *Advanced Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics* River Publishers. 2021. Chapter 14. P. 397-430. ISBN:978-87-7022-341-6 (Hardback), ISBN:978-87-7022-340-9 (Ebook) (SCOPUS)

113. Brunetkin O., Dobrynin Y., Maksymenko A., Maksymova O., Alyokhina S. Model and method of conditional formula determination of oxygen-containing hydrocarbon fuel in combustion. *Energetika*. 2020. №6/8 (1). P. 77–84

114. Juan A. Conesa, Núria Ortuño, Damià Palmer. Estimation of Industrial Emissions during Pyrolysis and Combustion of Different Wastes Using Laboratory Data. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, Article number: 6750. URL:<https://doi.org/10.1038/s41598-020-63807-w>

115. María A. Garrido, Rafael Font, Juan A. Conesa. Pollutant emissions from the pyrolysis and combustion of viscoelastic memory foam. *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 577. P. 183-194. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.159>

116. Julia Moltó, Rafael Font, Juan A. Conesa. Study of the Organic Compounds Produced in the Pyrolysis and Combustion of Used Polyester Fabrics. *Energy & Fuels*. 2006. Vol. 20(5). DOI:10.1021/ef060205e.

117. Тарахтій О.С., Бутенко О.В. Імітаційна модель твердих побутових відходів як об'єкта управління. *Вчені записки Таврійського національного університету Імені В.І. Вернадського*. 2021. Том 32(71), №2. С. 92-105. URL:https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/2_2021/part_1/39.pdf

118. Гелетуха Г. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні: Практичний посібник. К.: "Поліграф плюс", 2015, 72 с. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/posibnyk-onovlenyi-2016.pdf>

119. Maksimov M. V., Brunetkin A. I., Bondarenko A. V. Model and method for determining conditional formula hydrocarbon fuel combustion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013. Vol. 6, No. 8(66). P. 20-27. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.18702>

120. Gutberlet J. Waste, poverty and recycling. *Waste Management*. 2010. Vol.30, №2. P.171-173.

https://www.researchgate.net/publication/40449074_Waste_poverty_and_recycling

121. Максимов М.В. та ін. Автоматичне керування повільним піролізом органічних матеріалів із змінним складом, у передових системах керування: теорія та застосування. Серія з автоматизації, управління та робототехніки. Видавництво River, Кондратенко Ю.П. та ін. (Ред.). Розділ 14. 2021. С. 397-430. ISBN: 978-87-7022-341-6

122. Сабанін В. П. та ін. Регулювання навантаження та забезпечення ефективності парових котлів з екстремальним регулятором. Теплотехніка. інж. 2014. 61. С. 905-90. DOI:<https://doi.org/10.1134/S004060151411007X>

123. Ковріго Ю.М., Баган Т.Г., Бунке А.С. Забезпечення надійного керування в системах замкнутого керування інерційними теплоенергетичними установками, Терм. інж. 2014. 61. С.183-188. DOI:<https://doi.org/10.1134/S0040601514030057>

124. Morales S.A., Barragan D.R., Kafarov V. 3D CFD Simulation of Combustion in Furnaces Using Mixture Gases with Variable Composition, Chemical Engineering Transactions. 2018. Vol. 70. P.121-126. DOI: 10.3303/CET1870021

125. Yrjö Majanne, Timo Yli-Fossi, Timo Korpela, Maria Nurmoranta, Jukka Kortela. Utilization of Drum Boilers' Storage Capacity for Flexible Operation, IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, Issue 1. P. 2005-2010, ISSN 2405-8963, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.186>.

126. Joris Koornneef, Martin Junginger, André Faaij. Development of fluidized bed combustion—An overview of trends, performance and cost, Progress in Energy and Combustion Science. 2007. Vol. 33, Issue 1. P. 19-55, ISSN 0360-1285, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.peccs.2006.07.001>.

127. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023: Technical guidance to prepare national emission inventories (EMEP/EEA Guidebook). Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2023. ISBN 978-92-9480-598-0 ISSN 1977-8449. DOI: 10.2800/795737

128. Huttunen Marko, Peltola Juho, Kallio Sirpa, Karvonen Lassi, Niemi Timo, Ylä-Outinen Ville. Analysis of the processes in fluidized bed boiler furnaces during load changes. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 120. P. 580-587. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.175>
129. Wang, Y. et al. Review on the catalytic pyrolysis of waste oil for the production of renewable hydrocarbon fuels. *Fuel*. 2021. Vol. 283, 119170. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119170>
130. Annisa, R. et al. Environmental Impact Assessment of Steam Cycle and Combine Cycle Power Plants Using Life Cycle Assessment Methodology. 2018 Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), Solo, Indonesia. 2018. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICPERE.2018.8739338.
131. You, Z. Et al. Biogas power plants waste heat utilization researches. 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, Wuhan, China. 2009. P. 2478-2481. DOI: 10.1109/IPEMC.2009.5157820
132. Huang, H. et al. Biomass briquette fuel, boiler types and pollutant emissions of industrial biomass boiler: A review. *Particuology*. 2023. Vol. 77. P. 79-90. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.08.016>
133. Alfe, M. et al. The effect of temperature on soot properties in premixed methane flames. *Combustion and Flame*. 2010. Vol. 157. P. 1959-1965. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.02.007>
134. Davydov V.O., Bondarenko A.V. The method of calculating the combustion temperature of any mixture of hydrocarbon fuel for any excess air. *Works of Odessa polytechnic university*. 2013. Vol. 3 (42). P. 98-101. URL:<http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/5332>
135. Lysyuk O.V. Improvement of the heat load control system of a drum boiler for burning combustible artificial gases. *Bulletin of the Kherson National Technical University*. 2017. No. 3(62), P. 180-185. URL: [http://kntu.net.ua/ukr/content/download/82019/475551/file/%D0%92%D0%86%D0%A1%D0%9D%D0%98%D0%9A%20%E2%84%963\(62\)%20%D0%A2%D0%BE%D0%BC%201.pdf](http://kntu.net.ua/ukr/content/download/82019/475551/file/%D0%92%D0%86%D0%A1%D0%9D%D0%98%D0%9A%20%E2%84%963(62)%20%D0%A2%D0%BE%D0%BC%201.pdf)

136. Dobrovolska T., Lozhechnikov V. The automated control system of the burning fuel process with a variable calorific capacity for the refining Industry. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. Vol. 48. P. 25-30. DOI:10.1615/JAutomatInfScien.v48.i10.30

137. Brunetkin O.I., Gorban S.O. Heat transfer optimization of heat exchange surfaces of boiler equipment with decrease in consumption of combustion products. *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*. 2017. No 3(53). P. 32-36. DOI: 10.15276/opu.3.53.2017.04

138. Dobrovolskaya T.S., Maksimov M.V., Lozhechnikov V.F., Bondarenko A.V. The mathematical model of non-certified fuel combustion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Vol. 2, No. 8(68). P. 44-51. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.22420>

139. Гавриленко Б.В., Неєжмаков С.В. Синтез математичної моделі топки киплячого шару шахтного повітропідігрівача за нестационарних умов для завдань автоматичного управління. Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр. — К.: ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України. 2010. Вип. 57. С. 164-173. URL:<http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/21932/25-Gavrilenko.pdf?sequence=1>

140. Беглов К. В., Козлов О. В., Кондратенко Ю. П., Марколенко Т. Д., Кривда В. І. Автоматичне керування тепловою потужністю котла на основі зміни теплоти згоряння вуглеводневого палива. *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*. 2023. 68(2). С. 75–92. DOI: 10.34229/1028-0979-2023-2-6. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «А»)

141. Kryvda V., Brunetkin O., Beglov K., Markolenko T., Lutsenko I. Method of controlling the volume of combustion products at different boiler loads. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024, (1). С.100 – 104. DOI:<https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/100>

142. Дуба І.Е., Беглов К.В. Моделювання водогрійних котлів при глибоких збуреннях за теплотворною спроможністю палива. *Вчені записки*

Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки». 2018. Т. 29 (68). № 6 (1). С. 132–136.

URL:http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2018_29%2868%29_6%281%29__25

143. Sefidari Hamid, Razmjoo Narges, Strand Michael. An experimental study of combustion and emissions of two types of woody biomass in a 12-MW reciprocating-grate boiler. *Fuel*. 2014. 135. P.120–129. DOI:10.1016/j.fuel.2014.06.051.

144. Mirek P., Czakiert T., Nowak W. NO_x emission reduction by the optimization of the primary air distribution in the 235 MWe CFB boiler. Proc. of the Intern. Conf. FBC-20. China, Xian, May 18–21, 2009. P. 162–166. DOI:10.1007/978-3-642-02682-9_19

145. Anthony E.J., Granatstein D.L. Sulfation phenomena in fluidized bed combustion systems. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2001. № 27. P. 215–236. DOI:[http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285\(00\)00021-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285(00)00021-6)

146. J.F. Li¹, J.H. Mi¹, J.H. Hao, S. Yang, H.T. Huang, H.M. Ji, J.F. Lu, G.X. Yue Operational status of 300 MWe CFB boiler in China. Proc. of the Intern. Conf. FBC-20. China, Xian, May 18–21, 2009. P. 243–246. URL:https://www.researchgate.net/profile/Junfu-Lu/publication/226490292_Operation_Experience_and_Performance_of_the_First_300MWe_CFB_Boiler_Developed_by_DBC_in_China/links/55f7bf1f08ae07629dcb53e6/Operation-Experience-and-Performance-of-the-First-300MWe-CFB-Boiler-Developed-by-DBC-in-China.pdf

147. Otsuka N. A. Thermodynamic approach on vapor-condensation of corrosive salts from flue gas on boiler tubes in waste incinerators. *Corros. Sci.* 2008. V. 50. Is. 6. P. 1627–1636. DOI:10.1016/j.corsci.2008.02.004

ДОДАТОК А

Документи про впровадження результатів дослідження



**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «КОНКРИТ-СІСТЕМС»
(ТОВ «КОНКРИТ-СІСТЕМС»)**

65011, Одеська обл., м. Одеса, вул. Велика Арнаутська, буд. № 54,
тел.: 0674841145, Код ЄДРПОУ 43389868

Вих. №28/11
від "3" 10 2024 року

Ректору
НУ "ОДЕСЬКА Політехніка"
проф. Оборському Г.О.

ДОВІДКА

про впровадження в тематиці ТОВ "КОНКРИТ-СІСТЕМС" результатів дисертаційного дослідження «Моделі та методи АСК термічної деструкції ТПВ для забезпечення екологічних показників на основі сортування»

ТОВ "КОНКРИТ-СІСТЕМС" впроваджує розроблені матеріали дисертаційного дослідження «Моделі та методи АСК термічної деструкції ТПВ для забезпечення екологічних показників на основі сортування» здобувача ступеню PhD кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Лисюк Ганни Петрівни у виробничий процес, а саме: метод сортування промислових обсягів сировини на основі класифікації та ідентифікації твердих побутових відходів, що дозволяє виділити групи, що утворюють кислі гази, та метод розрахунку витрат на забезпечення екологічних показників проведення процесу термічної утилізації, включаючи процес очищення вуглеводневих газів.

Запропоновані методи дозволяють вибрати максимально ефективний та екологічно чистий спосіб термічної деструкції твердих побутових відходів.

Директор ТОВ "КОНКРИТ-СІСТЕМС"  Андрій ЮРЧАК





ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
Лисюк Ганни Петрівни
представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Лисюк Г. П. «Моделі та методи АСК термічної деструкції ТПВ для забезпечення екологічних показників на основі сортування» використовуються Національним університетом «Одеська політехніка» при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» в Інституті штучного інтелекту та робототехніки (ІШІР) на кафедрі «Програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій» при викладанні наступних дисциплін:

- Автоматизація виробничих процесів;
- Моделювання процесів і систем;
- Сучасні системи керування;
- Оптимальні та адаптивні системи управління.

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Перший проректор



Сергій НЕСТЕРЕНКО

Вик. Давидов В.О.
тел. 705-83-71



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
Лисюк Ганни Петрівни
представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Надана довідка затверджує, що дисертаційне дослідження Лисюк Г. П. «Моделі та методи АСК термічної деструкції ТПВ для забезпечення екологічних показників на основі сортування» виконане відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, і є складовою частиною держбюджетних НДР за темами: «Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи визначення якісного складу паливної суміші природнього та штучного походження», НДР № 239-47, (№0123U104326), «Розробка моделі та методу математичного забезпечення автоматизованих систем керування, які використовують паливо змінного складу для зменшення енергоємності виробництва», НДР №206-47, (№0122U000566) і «Підвищення ефективності АСК спеціального призначення за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів», НДР №224-47, (№0122U200907).

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Проректор

Вик. Давидов
тел. 705-83-71



Дмитро ДМИТРИШИН

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Lysiuk H., Maksymova O. Model and method of solid household waste sorting for their effective thermal disposal. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 31-46. DOI:<https://doi.org/10.23939/jeeecs2023.01.031>

2. Brunetkin O., Davydov V., Butenko O., Lysiuk G., Bondarenko A. Determining the composition of burned gas using the method of constraints as a problem of model interpretation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3, N 6 (99). P. 22-30. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169219> (SCOPUS)

3. Kozlov O., Kondratenko Y., Lysiuk H., Kryvda V., Maksymova O. Fuzzy Automatic Control of the Pyrolysis Process for the Municipal Solid Waste of Variable Composition . *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*. 2022. Vol.16, № 1. P. 83-94. DOI:[10.14313/JAMRIS/1-2022/9](https://doi.org/10.14313/JAMRIS/1-2022/9) URL:<https://sciendo.com/pl/article/10.14313/jamris/1-2022/9> (SCOPUS)

4. Петік Т.В., Лисюк Г.П. Автоматична система регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку 1000 МВт атомної електричної станції. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Том 30 (69), Ч. 2, №3. С.7-13. DOI:<https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/02> URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_2/4.pdf

5. Lysiuk H., Filippov Y., Panin V. Justification of equipment structure for solid municipal waste incineration. *Grail of science*. 2024. №47. P.461-466. DOI:<https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.12.2024.061> URL:<https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/20.12.2024/35>

6. Сичило А.А., Беглов К.В., Лисюк Г.П. Моделювання АСР потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 в режимі «Т». *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Том 30 (69) Ч. 1 № 3. С.158-163.

DOI:<https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/29>

URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/3-1_2019.pdf

7. Терлецький В.О., Лисюк Г.П. Моделювання АСР температури пару за редуційно-охолоджувальною установкою енергоблоку АЕС ВВЕР 1000 МВт. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30(69), Ч.1, № 3. С. 170-174. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/31>

URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/33.pdf

8. Lysiuk H., Sokoliuk S., Solohub O., Stafidov Y. Research on methods to reduce harmful emissions during the combustion of solid municipal waste in circulating fluidized bed furnaces. Modern engineering and innovative technologies. 2024. №36, Part 2. P.77-83. DOI:10.30890/2567-5273.2024-36-00-013

URL:<https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit36-02/meit36-02>

9. Чернофостова К.В., Лисюк Г.П. Підвищення якості регулювання рівня в баці деаератора енергоблоку АЕС із ВВЕР-1000. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30 (69), Ч. 1 № 3. С. 200-205. DOI:<https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/36>

URL:http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/38.pdf

10. Сичило А.А., Беглов К.В., Лисюк Г.П. Розробка АСК потужності енергоблоку АЕС3 ВВЕР-1000 в режимі «Т» (частина 2). Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. 2020. Том 31 (70), Ч. 1 No 2. С.181-186. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/28>

11. Maksymova O.B., Lysiuk H.P., Zhanko K.O., Bessarab V.P. Model and method of decision-making rules for the formation of the structure of technical equipment in processes of thermal destruction of msw in the normation of acid gases

emissions. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2024. No 39(115). С. 42- 54. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.39.115.2024.5>

12. Лисюк Г.П. Синтез системи управління тепловим навантаженням барабанного котла при спалюванні твердих побутових відходів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35 (74), № 5. С.178-187. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/27>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

13. Davydov V., Brunetkin V., Lysiuk G. Solution of the Inverse Incorrectly Posed Problem by the Library Method. Proceedings of the 12th International Conference on Applied Innovations in IT (ICAИТ), March 2024 Volume 12, Issue 1. P. 97-103. SCOPUS ISSN 2199-8876 DOI: <http://dx.doi.org/10.25673/115729> (SCOPUS)

14. Лисюк Г.П., Белов В.О., Рябошапка Р.М., Торопенко О.В. Метод сортування твердих побутових відходів для їх ефективною термічної утилізації. III Міжнародна науково-практична конференція «Science in the modern world: innovations and challenges». Торонто, Канада. 2024. С.281-287. URL:https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/SCIENCE-IN-THE-MODERN-WORLD-INNOVATIONS-AND-CHALLENGES-21-23.nov_.24.pdf

15. Лисюк Г.П., Лінник О.О., Лесів Б.І., Горалік О.Є. Метод нечіткого керування процесом піролізу твердих побутових відходів змінного складу. I Міжнародна науково-практична конференція «Future of science: innovations and perspectives». Стокгольм, Швеція. 2024. С.265-269. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/FUTURE-OF-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PERSPECTIVES-25-27.11.24.pdf>

16. Лисюк Г.П., Арику І.В., Соколюк С.О. Нечітка підсистема визначення оптимальних параметрів процесу піролізу. XIII Міжнародна науковопрактична конференція «Innovations in modern education: European and global context». Краків, Польща. 2024. С.308-310. URL:<https://eu-conf.com/wp->

content/uploads/2024/10/INNOVATIONS-IN-MODERN-EDUCATION-EUROPEAN-AND-GLOBAL-CONTEXT.pdf

17. Лисюк Г.П., Бабенко О.В., Захаров Ю.Ф., Мітяєв В.Б., Попов О.Ю. Удосконалення математичної моделі спалювання твердого палива змінного складу в топках з циркулюючим киплячим шаром. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Cultural and artistic processes in the context of the European scientific space». Валенсія, Іспанія. 2024. С.337-341. URL: <https://isg-konf.com/uk/cultural-and-artistic-processes-in-the-context-of-the-european-scientific-space/>

18. Лисюк Г.П., Скліфасовський Д.Є., Сологуб О.В., Стафідов Є.Б. Ефективність та керування термічною утилізацією твердих побутових відходів у топках із киплячим шаром. XLIX Міжнародна науково-практична конференція «New Areas of Scientific Research: Exploring New Frontiers». Неаполь, Італія. 2024. С.38-43. URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/11/New_areas_of_scientific_research_exploring_new_frontiers_November_27-29_2024_Naples_Italy.pdf

19. Лисюк Г.П., Сухань Р.В., Хирний В.І., Чебаненко М.О. Метод розрахунку витрат на забезпечення термічної утилізації твердих побутових відходів з дотриманням екологічних нормативів. IV Міжнародна науково-практична конференція «Science and technology: challenges, prospects and innovations». Осака, Японія. 2024. С.261-266. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-CHALLENGES-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-28-30.11.24.pdf>