

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

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

БРУНЕТКІН ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 681.54

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ПЕРЕРОБКИ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ ДОВІЛЬНОГО
СКЛАДУ ЗА РАХУНОК АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПОДАЧІ
СИРОВИНИ**

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



_____ В. О. Брунеткін

Науковий керівник Максимов М. В. доктор технічних наук, професор

Одеса – 2024

АНОТАЦІЯ

Брунеткін В. О. Підвищення переробки органічних відходів довільного складу за рахунок автоматичного керування подачі сировини.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Національний університет «Одеська політехніка» МОН України, Одеса, 2024.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню продуктивності та конкурентоспроможності автоматизованої системи керування установкою термічної деструкції для переробки органічних відходів довільного складу при їх термічній утилізації. Підвищення продуктивності та конкурентоспроможності відбувається за рахунок ідентифікації складу сировини методами та моделями розрахунку рівноважного складу продуктів термічної деструкції.

У першому розділі «Методи термічної деструкції органічних речовин різноманітного походження та складу»:

- Розглянуто можливі джерела походження органічних відходів. Виокремлено дві їхні групи: відходи біомаси та тверді побутові відходи.

- Проведено оцінку енергетичного потенціалу рослинної біомаси в Україні. Розглянуто можливі технологічні схеми процесу термодеструкції біомаси та способи управління ними.

- Визначено структуру твердих побутових відходів. Виявлено залежність співвідношення компонентів, що входять до відходів, від пори року та джерела походження. Розглянуто можливі технологічні схеми переробки твердих побутових відходів.

- Зазначено складність розроблення моделі процесу термодеструкції для різних видів сировини. Як один зі шляхів розв'язання цієї проблеми виділено апроксимаційний спосіб побудови моделі. Відзначено необхідність формалізації цього процесу.

У другому розділі «Розробка моделі розрахунку складу та енергетичної характеристики продуктів термодеструкції органічних речовин»:

– Отримала подальший розвиток модифікація моделі та алгоритму розрахунку процесу рівноважної термодеструкції органічних речовин. Основною зміною стало використання мольних часток визначення рівноважного складу продуктів реакції, включаючи як газоподібну, і конденсовану фази. Це вимагало коригування лінеаризованих рівнянь закону діючих мас і рівняння, що замикає, для обліку конденсованої фази.

– Константи хімічної рівноваги, які зазвичай наводяться для парціальних тисків, були адаптовані для мольних часток, що дозволило використовувати їх у модифікованій моделі.

– Для перевірки та підтвердження точності методу була проведена верифікація та валідація на прикладі розрахунку складу продуктів згоряння, що включають газоподібну та конденсовану фази. Результати показали добрий збіг з наявними даними при газоподібних продуктах горіння. Також було продемонстровано адекватне відображення змін кількості конденсованої фази при зміні температури.

– Показано чутливість визначення кількісного складу та температури продуктів згоряння при виборі їх переліку, що відрізняється від реального. Це дозволило виявити важливість правильного складання переліку компонентів достовірності розрахунків.

– Отримала подальший розвиток імітаційна модель процесів піролізу та газифікації, що дозволяє отримати склад продукт-газу з максимальною теплотворною здатністю при мінімальній кількості вуглецевого залишку при різному складі вихідної сировини. Мінімальна кількість вуглецевого залишку визначає можливість отримання максимально можливого обсягу суміші горючих газів. Максимальна теплотворна здатність обумовлена організацією процесу переробки в сверхадіабатичному режимі з мінімально можливим використанням повітря як окислювач.

В третьому розділі «Розроблення методу побудови лінійної апроксимаційної диференціальної моделі об'єкта керування»:

– Отримано за допомогою перетворення Лапласа на основі апроксимації у вигляді степеневого ряду експериментальної характеристики розгону, її вираз у просторі зображень у вигляді скороченого ряду. Результатом відображення цього ряду у вигляді апроксимації Паде є раціональний дріб - аналог передавальної функції деякої лінійної моделі. У просторі оригіналів її можна відобразити у вигляді кількох лінійних диференціальних рівнянь, які є апроксимаційною моделлю розглянутого об'єкта керування.

– Показано можливість побудови двовимірної апроксимаційної моделі на основі отриманої одновимірної моделі. За другим аргументом апроксимація проводиться за допомогою усіченого ряду (полінома) методом найменших квадратів. На місці значень функцій використовуються отримані одновимірні моделі. Кількість одновимірних моделей визначається кількістю експериментальних кривих.

– Вперше застосування розглянутого методу під час налаштування автоматичних регуляторів дає змогу апроксимувати об'єкти керування з не монотонною кривою розгону. До теперішнього часу такий підхід не розглядався в практичних інженерних розрахунках. Для зазначених об'єктів керування налаштування регуляторів здійснюється емпіричними методами, що не гарантує заданої якості перехідного процесу.

В четвертому розділі «Система керування установкою термодеструкції органічних речовин різного походження»:

– Була розроблена імітаційна математична модель установки термодеструкції органічних речовин на основі її опису, що дає змогу дослідити її динамічні властивості. Основні канали регулювання являють собою інерційну ланку першого порядку із запізнюванням. Параметри цієї ланки, такі як постійна часу і величина запізнювання, залежать від геометричних розмірів установки і потребують індивідуального налаштування для кожної конкретної установки.

– Встановлено, що на етапі моделювання існують режими роботи, за яких установка може перейти зі стійкого стану в нестійкий через наявність позитивного зворотного зв'язку. Це обумовлено співвідношенням між витратами вихідної

сировини і витратою рециркуляційного газу. Наявність регуляторів дає змогу стабілізувати технологічний процес піролізу на заданих значеннях.

– Показано, що на етапі моделювання автоматичної системи регулювання достатньо використовувати одноконтурні регулятори. Вимкнення будь-якого з регуляторів призводить до погіршення якості регулювання, проте система загалом продовжує функціонувати стабільно.

– Встановлено, що система регулювання добре справляється зі збуреннями. За різноспрямованих збурень (зміна витрати продукт-газу і зміна теплотворної здатності) досягається максимальне значення продукт-газу. За співспрямованих збурень (зміна витрати продукт-газу і теплотворної здатності вихідної сировини) теплотворна здатність палива становить близько 98% від максимально можливого значення.

– Побудова моделі газифікації деревної сировини за допомогою кисневого дуття дала змогу продемонструвати можливості пропонованого підходу при мінімізації обчислювальних витрат. Збільшення в моделі переліку можливих хімічних реакцій дасть змогу в рамках єдиного підходу досліджувати процеси горіння, піролізу та газифікації. Можуть використовуватися будь-які окислювальні агенти. Наприклад, повітряне, кисневе, пароповітряне, парокисневе, парове дуття. Може бути враховано різний спосіб внесення додаткової зовнішньої енергії. Наприклад, через огорожувальні конструкції (теплообмінники), з паровим дуттям.

– Вперше запропоновано спосіб керування величиною ККД газового котла при змінному навантаженні за рахунок зміни об'єму димових газів. Величину їхнього об'єму запропоновано регулювати за рахунок зміни співвідношення в паливній суміші метану і газоподібних продуктів термодеструкції органічних відходів.

Ключові слова: комп'ютерна система автоматизації, автоматизоване управління, ефективність використання енергоресурсів, управління тепловою потужністю, зміна теплотворної здатності палива, використання сировини змінного складу, управління процесом піролізу, відходи змінного складу, вплив на навколишнє середовище, скорочення викидів парникових газів, екологічна ефективність експлуатації енергоустановок.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Brunetkin O., Beglov K., **Brunetkin V.**, Maksymov O., Maksymova O., Havaliukh O., Demydenko V. Construction of a method for representing an approximation model of an object as a set of linear differential models // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. 6/2 (108), 66–73. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.220326> (SCOPUS)

2. Brunetkin O., Maksymov M., **Brunetkin V.**, Maksymov O., Dobrynin Y., Kuzmenko V., Gultsov P. Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 4/1 (112), 41–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239150> (SCOPUS)

3. **Брунеткін В.О.**, Давидов В.О., Тарахтій О.С. Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин з використанням рівноважної моделі // [Вісник Херсонського національного технічного університету](#) / інженерні науки. 2023. 2(85), 9–19. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.1>

4. **Брунеткін В.О.**, Давидов В.О., Тельпіс Р.Ф., Жанько К.О. Метод мінімізації втрати з димовими газами шляхом управління їх кількістю при змінному навантаженні котла. // Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35 (74), №1, 111–117. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/17>

5. Davydov V., **Brunetkin V.**, Lysiuk G. Solution of the Inverse Incorrectly Posed Problem by the Library Method. // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. Volume 12, Issue 1, pp. 97-103. DOI: [10.25673/115647](https://doi.org/10.25673/115647); PPN [1884680704](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ppn-urn-1884680704) (ISSN 2199-8876) (SCOPUS)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. **Брунеткін В.О.** Комбінований шаровий газогенератор / В.О. Брунеткін, В.О. Давидов // The 22th International scientific and practical conference “Modern theories

and improvement of world methods” (June 06–09, 2023) Helsinki, Finland. International Science Group. 2023. p. 440-443. [URL:https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22](https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22)

7. **Брунеткін В.О.** Схема комплексної піролітично-газифікаційної переробки непідготовлених органічних речовин // Тези доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції 84 «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», 27–28 квітня 2021 р. Харків.

<https://web.kpi.kharkov.ua/turbine/wp-content/uploads/sites/100/2021/10/Konferentsiya-tezisy-2021.pdf>

8. Брунеткін О. І., **Брунеткін В. О.** Визначення складу продуктів реакції термічної переробки органічних речовин довільного невідомого складу // IX Наукова конференція «НАУКОВІ ПІДСУМКИ 2020 РОКУ». Збірка наукових праць. – Харків, Х.: Технологічний Центр, 2020. – 70 с.
<https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/8214/1/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%81%D1%83%D0%BC%D0%BA%D0%B8%202020.pdf>

ABSTRACT

Brunetkin V. O. Increasing processing of organic waste of arbitrary composition due to automatic control of raw material supply.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 – automation and computer-integrated technologies. - National University "Odesa Polytechnic" of the Ministry of Education and Culture of Ukraine, Odesa, 2024.

The dissertation work is devoted to improving the productivity and competitiveness of the automated control system of the thermal destruction installation for the processing of organic waste of arbitrary composition during their thermal utilization. Productivity and competitiveness increase due to the identification of the composition of raw materials using methods and models for calculating the equilibrium composition of thermal destruction products.

In the first chapter "Methods of thermal destruction of organic substances of various origin and composition":

- Considered possible sources of origin of organic waste. Two of their groups are distinguished: biomass waste and solid household waste.

- An assessment of the energy potential of plant biomass in Ukraine was carried out. Possible technological schemes of the process of thermal destruction of biomass and methods of their management are considered.

- The structure of solid household waste was determined. The dependence of the ratio of components included in waste on the season and source of origin was revealed. Possible technological schemes of solid household waste processing are considered.

- The complexity of developing a thermal destruction process model for different types of raw materials is indicated. As one of the ways to solve this problem, the approximation method of building the model is highlighted. The need to formalize such a process is emphasized.

In the second chapter "Development of a model for calculating the composition and energy characteristics of products of thermal destruction of organic substances":

- The modification of the model and the calculation algorithm of the process of equilibrium thermal destruction of organic substances received further development. The main change was the use of mole fractions to determine the equilibrium composition of reaction products, including both gaseous and condensed phases. This required adjusting the linearized equations of the effective mass law and the closing equation to account for the condensed phase.

- Chemical equilibrium constants, which are usually given for partial pressures, were adapted for mole fractions, which allowed their use in the modified model.

- To check and confirm the accuracy of the method, verification and validation was carried out on the example of calculating the composition of combustion products, which include gaseous and condensed phases. The results showed a good agreement with the available data for gaseous combustion products. Adequate representation of changes in the amount of condensed phase with changes in temperature was also demonstrated.

- The sensitivity of determining the quantitative composition and temperature of combustion products when choosing their list, which differs from the real one, is shown. This made it possible to reveal the importance of correctly compiling a list of calculation reliability components.

- The simulation model of pyrolysis and gasification processes has received further development, which allows obtaining the product-gas composition with the maximum calorific value with the minimum amount of carbon residue with different composition of raw materials. The minimum amount of carbon residue determines the possibility of obtaining the maximum possible volume of a mixture of combustible gases. The maximum calorific value is due to the organization of the processing process in the supra-adiabatic mode with the minimum possible use of air as an oxidizer.

In the third section "Development of the method of building a linear approximation differential model of the control object":

- Obtained using the Laplace transform based on the approximation in the form of a power series of the experimental acceleration characteristic, its expression in the space of images in the form of a reduced series. The result of displaying this series in the form of the Padé approximation is a rational fraction - an analogue of the transfer function of some linear model. In the space of the originals, it can be displayed in the form of several linear differential equations, which are an approximation model of the considered control object.

- The possibility of building a two-dimensional approximation model based on the obtained one-dimensional model is shown. According to the second argument, the approximation is carried out using a truncated series (polynomial) using the method of least squares (MS). The obtained one-dimensional models are used instead of function values. The number of one-dimensional models is determined by the number of experimental curves.

- For the first time, the application of the considered method during the setting of automatic regulators makes it possible to approximate control objects with a non-monotonic acceleration curve. Until now, this approach has not been considered in practical engineering calculations. For the specified control objects, the adjustment of the

regulators is carried out by empirical methods, which does not guarantee the given quality of the transition process.

In the fourth chapter "Control system of the installation of thermal destruction of organic substances of various origins":

- A simulation mathematical model of the thermodestruction of organic substances was developed based on its description, which makes it possible to study its dynamic properties. The main control channels are a first-order inertial link with a delay. The parameters of this link, such as the time constant and the amount of delay, depend on the geometric dimensions of the installation and require individual adjustment for each specific installation.

- It is established that at the stage of modeling there are modes of operation under which the installation can go from a stable state to an unstable state due to the presence of positive feedback. This is due to the ratio between the consumption of raw materials and the consumption of recirculation gas. The presence of regulators makes it possible to stabilize the technological process of pyrolysis at set values.

- It is shown that at the stage of modeling the automatic control system (ACS), it is sufficient to use single-loop controllers. Turning off any of the regulators leads to a deterioration in the quality of regulation, but the system in general continues to function stably.

- It is established that the control system copes well with disturbances. The maximum value of the product gas is reached under multidirectional disturbances (change in product-gas flow rate and change in calorific value). Under co-directed disturbances (change in product-gas consumption and calorific value of raw materials), the calorific value of the fuel is about 98% of the maximum possible value.

- Building a model of gasification of wood raw materials with the help of oxygen blowing made it possible to demonstrate the possibilities of the proposed approach while minimizing computational costs. Increasing the list of possible chemical reactions in the model will make it possible to study combustion, pyrolysis and gasification processes within the framework of a unified approach. Any oxidizing agents can be used. For example, air, oxygen, steam-air, steam-oxygen, steam blowing. A different way of

introducing additional external energy can be taken into account. For example, through enclosing structures (heat exchangers), with steam blowing.

– For the first time proposed a method of controlling the efficiency of a gas boiler at variable load by changing the volume of flue gases. It is proposed to regulate their volume by changing the ratio in the fuel mixture of methane and gaseous products of thermal destruction of organic waste.

Key words: computer automation system, automated control, energy efficiency, thermal power management, changes in the calorific value of fuel, use of raw materials of variable composition, pyrolysis process management, waste of variable composition, environmental impact, reduction of greenhouse gas emissions, environmental efficiency of power plants.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

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

1. Brunetkin O., Beglov K., **Brunetkin V.**, Maksymov O., Maksymova O., Havaliukh O., Demydenko V. Construction of a method for representing an approximation model of an object as a set of linear differential models // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. 6/2 (108), 66–73. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.220326> (SCOPUS)

2. Brunetkin O., Maksymov M., **Brunetkin V.**, Maksymov O., Dobrynin Y., Kuzmenko V., Gultsov P. Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 4/1 (112), 41–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239150> (SCOPUS)

3. **Brunetkin V.O.**, Davydov V.O., Tarakhtiy O.S. Research of thermochemical conversion of organic substances using the equilibrium model // Bulletin of the Kherson National Technical University / engineering sciences. 2023. 2(85), 9–19. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.1>

4. **Brunetkin V.O.**, Davydov V.O., Telpis R.F., Zhanko K.O. The method of minimizing loss with flue gases by controlling their quantity at variable boiler load. // Informatics, computer technology and automation. Academic notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. Series: Technical sciences. 2024. Volume 35 (74), No. 1, 111–117. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/17>

5. Davydov V., **Brunetkin V.**, Lysiuk G. Solution of the Inverse Incorrectly Posed Problem by the Library Method. // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. Volume 12, Issue 1, pp. 97-103. DOI:10.25673/115647; PPN [1884680704](https://doi.org/10.25673/115647) (ISSN 2199-8876) (SCOPUS)

Published works of approbation nature:

6. **Brunetkin V.O.** Combined layer gas generator / V.O. Brunetkin, V.O. Davydov // The 22th International scientific and practical conference "Modern theories and improvement of world methods" (June 06–09, 2023) Helsinki, Finland. International Science Group. 2023. p. 440-443. URL:<https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22>

7. **Brunetkin V.O.** The scheme of complex pyrolytic-gasification processing of unprepared organic substances // Abstracts of the reports of the XVII International Scientific and Technical Conference 84 "Energy and Heat Engineering Processes and Equipment", April 27–28, 2021, Kharkiv. <https://web.kpi.kharkov.ua/turbine/wp-content/uploads/sites/100/2021/10/Konferentsiya-tezisy-2021.pdf>

8. Brunetkin O.I., **Brunetkin V.O.** Determination of the composition of reaction products of thermal processing of organic substances of arbitrary unknown composition // IX Scientific Conference "SCIENTIFIC RESULTS OF 2020". Collection of scientific papers. – Kharkiv, Kh.: Technological Center, 2020. – 70 p. <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/8214/1/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%81%D1%83%D0%BC%D0%BA%D0%B8%202020.pdf>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 МЕТОДИ ТЕРМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН РІЗНОМАНІТНОГО ПОХОДЖЕННЯ ТА СКЛАДУ	27
1.1 Джерела органічних відходів	27
1.2 Джерело відходів біомаси.....	29
1.2.1 Потенціал рослинної біомаси вУкраїні	29
1.2.2 Використання соломи як джерело енергії	32
1.2.3 Термодеструкція та спалювання продуктів термодеструкції соломи. Управління процесом термодеструкції біомаси	33
1.2.4 Технологічні схеми піролізу біомаси	34
1.3 Утворення твердих побутових відходів	37
1.3.1 Структура ТПВ	40
1.3.2 Енергетичні технології переробки ТПВ	42
1.4 Метод представлення апроксимаційної моделі об'єкта як множини лінійних диференційних моделей.....	48
1.4.1 Актуальність формалізації розробки апроксимаційних моделей об'єктів управління	48
1.4.2 Методи побудови моделей об'єктів.....	49
1.5 Підвищення ефективності управління процесами термодеструкції органічної сировини за допомогою методів та засобів автоматизованих систем...	51
1.6 Постановка завдань дослідження	58
1.7 Висновки до розділу	64

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ СКЛАДУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТІВ ТЕРМОДЕСТРУКЦІЇ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН	66
--	----

2.1 Математична модель визначення складу продуктів термодеструкції (піролізу).....	66
2.2 Метод розв'язання модельної задачі.....	70
2.3 Верифікація моделі та алгоритму рішення.....	75
2.3.1 Верифікація на прикладі горіння метано-повітряної суміші.....	75
2.3.2 Верифікація на прикладі горіння-газифікації-повільного піролізу деревини сосни	79
2.3.3 Валідація за складом продуктів згоряння.....	83
2.4 Імітаційна модель процесів піролізу та газифікації	84
2.4.1 Вибір схеми встановлення.....	84
2.4.2 Оцінка працездатності рівноважної моделі піролізу	88
2.4.3 Склад продуктів піролізу.....	91
2.5 Ідентифікація бруutto-формули та ентальпії продуктів термодеструкції у процесі їх допалювання	94
2.5.1 Спосіб заповнення бібліотеки рішень прямої задачі у вигляді робочого тривимірного масиву.....	95
2.5.2 Метод пошуку рішення при використанні даних робочого тривимірного масиву.....	98
2.5.3 Приклади розв'язання задач визначення складу палива. Імітація технологічних вимірів без урахування приладових похибок	100
2.6 Висновки до розділу	101

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ПОБУДОВИ ЛІНІЙНОЇ АПРОКСИМАЦІЙНОЇ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ .	103
---	-----

3.1 Алгоритм подання одновимірної апроксимаційної моделі об'єктів керування.....	103
--	-----

3.2 Метод визначення одновимірної апроксимаційної моделі об'єктів керування.....	107
--	-----

3.3 Метод двовимірної ідентифікації нелінійного об'єкта керування.....	118
--	-----

3.4 Висновки до розділу	126
-------------------------------	-----

РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ ТЕРМОДЕСТРУКЦІЇ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ	128
---	-----

4.1 Управління трмодеструкцією.....	128
-------------------------------------	-----

4.2 Синтез системи керування установкою отримання продукт-газу.....	130
---	-----

4.3 Приклад реалізації установки термодеструкції органічних речовин довільного складу	141
---	-----

4.3.1 Економічні та екологічні причини зростання зацікавленості у процесах та пристроях термодеструкції органічних речовин довільного складу	141
--	-----

4.3.2 Існуючі методи термодеструкції органічних речовин.....	142
--	-----

4.3.3 Установка термодеструкції органічної сировини	145
---	-----

4.3.4 Розрахунок параметрів процесу газогенерації (з прикладу деревних відходів).....	147
---	-----

4.3.5 Зменшення викидів парникових газів під час керування об'ємом димових газів	158
--	-----

4.4 Висновки по розділу	162
-------------------------------	-----

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	168
---------------------------------	-----

ДОДАТОК А	183
-----------------	-----

ДОДАТОК Б	186
-----------------	-----

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСК – автоматична система керування

КІСК – комп’ютерно-інтегрована система керування

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ПІ – пропорційно-інтегральний

ПД – пропорційно диференціальний

ПІД -пропорційно-інтегрально-диференціальний

СЕС – сонячна електрична станція

ТЕС – теплова електрична станція

ТПВ — тверді побутові відходи

ЖКГ— житлово-комунальне господарство

ККД — коефіцієнт корисної дії

NG – природний газ

BFG – доменний газ

COG – коксовий газ

ПЗ – продукти згоряння

ВСТУП

Питання екології відіграють значну роль у житті сучасного суспільства, зачіпають багато його сторін. Основна їхня мета - зниження витрат ресурсів і зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище. Парадокс полягає в тому, що заходи, які вживають для вирішення питань екології, часто ведуть до збільшення витрат ресурсів і посилюють техногенний вплив на природу.

Як один із напрямів розв'язання екологічних завдань розглядається розвиток сонячної та вітрової електроенергетики. До теперішнього моменту в деяких країнах їхня частка в енергобалансі досягла значної величини (~47% у Німеччині). Але це в одній країні. У групі поруч розташованих країн такого становища досягти важко. Буває збіг обставин, коли настає безвітряна ніч або дуже вітряний сонячний день. У цьому разі необхідно компенсувати генерувальні потужності, що випадають (вночі) або мати можливість реалізувати надлишок електроенергії (вдень). Ці завдання вирішують теплові, гідроелектростанції сусідніх країн шляхом запуску або зупинки резервних потужностей [1]. Іншими словами, використання сонячної та вітрової енергетики не дають змоги в істотній частині відмовитися від традиційних способів генерації. Просто відповідні потужності видавлюються в сусідні країни, потрібні додаткові кошти на їх утримання, додаткові запаси органічного палива. Іноді це може призводити до парадоксальної ситуації. Так, наприклад, 17 лютого 2020 року внаслідок роботи вітрогенераторів на повну потужність вартість електроенергії у Фінляндії мала від'ємну величину: виробники доплачували, щоб споживачі забрали в них вироблену електроенергію. Виробники отримали збиток. У такий спосіб проявився недолік альтернативних видів енергії у вигляді поганої їх диспетчеризації (регулювання).

Ще однією стороною екологічних проблем є завдання утилізації побутових сільськогосподарських та інших видів органічних відходів. Зростаюча величина їхніх обсягів [2, 3] призвела до кризи можливості їх складування на різного виду полігонах. У Європі, як у регіоні, що найгостріше відчуває проблему виділення місць для складування відходів, розроблено дорожню карту поводження з ними [4].

Відповідно до неї до 2035 року країнам Євросоюзу буде дозволено розміщувати на полігонах не більше 10% комунальних відходів. Для досягнення цих показників широко впроваджується сортування відходів з подальшим їхнім ресайклінгом (повторним використанням) [5] і компостуванням. Незважаючи на це ~ 50% відходів зараз (і в майбутньому) доводиться або просто спалювати, або спалювати з отриманням енергії [6]. Наразі в країнах Євросоюзу спалюють ~ 100 млн тонн сміття на рік. До 2035 року планується довести цю цифру до величини ~ 140 млн тонн. Термічне знищення відходів належить до найбрудніших способів їхнього перероблення, але не має альтернативи зараз. Однією з головних причин забрудненості викидів сміттєспалювальних заводів є змінний і невідомий склад сировини (сміття), що підлягає спалюванню. У результаті цього не вдається організувати керований процес подачі повітря для оптимізації процесу горіння.

Отримання енергії при спалюванні таких значних обсягів органічних відходів привабливе саме по собі. Але актуальність цього процесу може зрости, якщо його розглядати з альтернативними джерелами (сонячні та вітроагрегати) з погляду спільної диспетчеризації процесів за умови виключення або зменшення використання викопних видів органічних палив. Реалізація такого процесу ускладнена, як і в разі забрудненості викидів сміттєспалювальних заводів, мінливістю складу сировини та незадовільною керованістю процесу її горіння. У зв'язку з цим є актуальним розробка способу керованої термічної переробки органічних речовин змінного невідомого складу.

Проблема змінності складу органічних речовин, що переробляються, є важливою у контексті ефективного управління відходами. Один із можливих шляхів вирішення цієї проблеми - сортування відходів з метою гомогенізації складу фракцій. У деяких країнах, таких як Швеція, де система збирання та переробки сміття досить добре розвинена, все ж існує проблема сортування. Склад відсортованого сміття може змінюватися в залежності від регіону, де він збирається, або від пори року [7]. Такі зміни у складі можуть впливати на ефективність його подальшої переробки та використання. Тому виробники технологій та оператори систем управління відходами повинні удосконалювати методи сортування та

адаптувати їх до умов конкретного регіону та його особливостей. Відсутність у більшості місць налагодженої системи сортування органічних відходів є стримуючим фактором їхньої переробки. Скрутне становище з переробкою відсортованих відходів навіть у розвинених країнах підтверджується і незалежним дослідженням The Guardian. У ньому, посилаючись на федеральний звіт у США, кількість відсортованого пластику в цій країні, що відправляється на вторинну переробку, визначено лише в 5%. Решту відправляють на полігони складування (звалища). Така ситуація склалася після відмови Китаю з 2017 року в імпорті для переробки відходів зі США через погане сортування. За твердженням The Washington Post за таких умов до 2030 року США зіткнуться з дефіцитом переробних потужностей для 37 млн тонн сміття. З наведених даних випливає, що і в попередні роки відсортовані відходи здебільшого не переробляли, а вивозили в інші країни. Схожа ситуація складається і в європейських країнах. Так Німеччина по праву посідає провідне місце в Європі з сортування та переробки відходів. Але і вона не справляється з цим завданням. Офіційна вимога щодо переробки пластикових відходів 36%. Але до їх числа входив пластик відсортований і вивезений до Китаю. За оцінкою BDE (Федеральне об'єднання німецьких підприємств зі збору та переробки відходів, водної та сировинної промисловості), з 2017 до 2018 року обсяг ввезених до Китаю пластикових відходів впав на 95 відсотків: з 340 тисяч до 16 тисяч тонн. Дорожня карта Європейського союзу з утилізації муніципальних відходів передбачає до 2035 року поховання на полігонах не більше 10% від їхнього обсягу. Решта має перероблятися або спалюватися. Spiegel зазначає, що зараз тільки 16% пластикових відходів піддається вторинній переробці.

Переробка органічних відходів є важливою складовою сучасних стратегій утилізації та поводження з відходами. Однак, способи їх переробки можуть мати значний вплив на навколишнє середовище. Особливо неефективним і навіть шкідливим способом вважається спалювання органічних відходів на сміттєспалювальних заводах, оскільки це призводить до викиду шкідливих речовин у атмосферу [8]. Замість цього, одним із перспективних напрямків утилізації

вважається двостадійний процес, який базується на піролізі органічних відходів з подальшим використанням отриманих продуктів [9].

Піроліз - це процес термічного розкладання органічних речовин при відсутності повітря або при нестачі його. Цей процес може бути використаний для виробництва хімічно активних речовин, що можуть бути використані у різних промислових процесах. Піроліз має перевагу перед анаеробним зброджуванням з точки зору енергоефективності, оскільки для підтримки його параметрів достатньо лише невеликої частини утворених горючих речовин. Інтересним аспектом піролізу є можливість внутрішнього обігріву реакційної зони за рахунок енергії, що виділяється під час процесу. Це відкриває шлях до ефективного та регульованого процесу переробки органічних відходів без необхідності використання зовнішніх джерел енергії [10]. Такий підхід може не лише зменшити витрати на пальне, але й забезпечити рівномірне прогрівання реакційної зони, що важливо для забезпечення ефективності процесу.

Організація даного способу піролізу стримується через невизначеність і змінність складу вихідної сировини, а також її високою вологістю в багатьох випадках. За умов підвищеного вологовмісту процес газифікації може бути організовано на основі методу, що останнім часом отримав значний розвиток. Цей метод базується на реалізації процесу, що відповідає фільтраційному горінню в сверхадіабатичному режимі. Такий процес дозволяє спалювати органічні речовини низької калорійності або проводити його так, щоб до 95% теплової енергії згоряння було перетворено на калорійність продуктів, що утворюються в газовій фазі. Це дозволяє переробляти матеріали з низьким вмістом вуглецю (від 10%) і вологістю до 60%. За умови заданого складу речовини, що переробляється, її газифікація в сверхадіабатичному режимі дає змогу зменшити витрату паливної складової при одночасному збільшенні температури в реакційній зоні. Внаслідок цього збільшується вихід горючих газів та одночасно зменшується кількість твердого (вуглистого) залишку. Особливістю процесу горіння в сверхадіабатичному режимі є зустрічний рух вихідної сировини (пального) і фронту горіння разом з його продуктами. Продукти горіння забезпечують сушіння сировини та її початкове

розкладання до надходження в зону екзотермічних реакцій. Таким чином, у зону реакції не надходить видалена волога і продукти низькотемпературного розкладання, що зменшує вихід горючих газів. До недоліків цього процесу слід віднести неможливість керування витратою продуктів реакції при заданому температурному режимі процесу. Витрата залежить від розміру реактора і складу вихідної сировини.

Зазначені вище процеси при схожості термохімічних перетворень мають різний характер продуктів реакцій. Під час спалювання відбувається повна газифікація вуглеводневої складової вихідної речовини. Внаслідок максимально глибокого ступеня окислення всі гази є не горючими. Під час газифікації також відбувається повне перетворення вихідної вуглеводневої речовини на газоподібні складові. Відмінність виникає через неповне їх окислення внаслідок нестачі окислювача. У результаті частина газів є горючими. При повільному піролізу внаслідок повної відсутності окислювача ступінь окислення продуктів мінімальний і частка горючих газів зростає порівняно з процесом газифікації. Але ще однією відмінністю від попередніх двох процесів є наявність твердого вуглистого залишку.

У результаті проведеного аналізу за темою дисертації було виявлено науково-технічне протиріччя. Єдність термохімічних процесів у розглянутих випадках і, водночас, відмінність у продуктах реакції породжує низку комбінацій визначальних чинників. Відмінності ведуть до можливості застосування в кожному випадку найефективніших методів. Єдність дає змогу переносити результати, отримані в одному процесі, на інші. Такий підхід відкриває можливість для розроблення методу розв'язання задач спалювання, газифікації та повільного піролізу вуглеводневих речовин невідомого, зокрема й змінного складу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, які виконано в Національному університеті «Одеська політехніка», і є складовою частиною держбюджетних НДР за темою: «Підвищення ефективності комп'ютерно-інтегрованих систем управління (KICU) за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів», НДР № 235-47, (№0123U102484) і

«Розробка моделі і методу ефективного керування експлуатацією енергоустановок від поновлюваних джерел енергії для забезпечення балансу енергосистеми» НДР № 205-55 (№0122U000565).

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення ефективності використання енергоресурсів, одержуваних у процесі керованої термодеструкції органічної сировини змінного складу, та зменшення впливу на навколишнє середовище за рахунок ідентифікації складу сировини методами та моделями розрахунку рівноважного складу продуктів розкладання.

Досягнення мети здійснюється:

- аналізом джерел органічних відходів довільного складу які є сировиною для виробництва горючих газів для формалізації завдань керування;
- розробкою методів та моделей ідентифікації складу сировини за рахунок визначення рівноважного складу продуктів термічної деструкції;
- розробкою моделі об'єкта керування автоматизованої системи для установки термічної деструкції при переробці органічних відходів довільного складу;
- розробкою моделі автоматизованої системи установки термічної деструкції для переробки органічних відходів довільного складу.

Об'єкт дослідження – процеси різної глибини керованої термодеструкції органічних речовин довільного походження та складу

Предмет дослідження – комп'ютерно інтегрована система управління процесом термодеструкції органічних речовин довільного походження на основі визначення їх складу в режимі реального часу

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використані положення теорії хімічної кінетики і рівняння матеріального балансу – для розробки моделі визначення довільного складу газоподібного палива в режимі реального часу; метод апроксимації Паде - для створення на основі експериментальних даних лінійної диференціальної моделі об'єкта; чисельні та аналітичні методи розв'язання диференціальних рівнянь; методи чисельного моделювання зміни властивостей

об'єкта керування, сучасні системи комп'ютерної математики застосовувалися для обчислення значень параметрів систем управління теплоенергетичним обладнанням.

Наукова новизна отриманих результатів.

– Знайшла подальший розвиток модель визначення складу продуктів термодеструкції при відомому складу вихідної органічної сировини, яка складається з рівнянь закону діючих мас, закону збереження речовини, де замість концентрацій продуктів розкладання використані їх мольні частки, що дало можливість одночасного врахування газової та конденсованої фаз.

– Знайшла подальший розвиток модель ідентифікації бруто-формули та ентальпії продуктів термодеструкції за рахунок вимірювання технологічних параметрів процесу їх допалювання у спеціальному пристрої, що дало можливість визначення бруто-формули та ентальпії вихідної органічної сировини.

– Вперше запропоновано метод синтезу моделі об'єкта керування у вигляді системи диференціальних рівнянь, за рахунок використання метода апроксимації Паде по експериментальним даним, що дало змогу отримати передавальну функцію об'єкта керування.

– Знайшла подальший розвиток імітаційна модель системи керування установкою термічної деструкції для переробки органічних відходів довільного складу, яка поточні розв'язки моделі об'єкта керування, у вигляді витрати рециркуляційних продуктів термічної деструкції та мінімальну кількість повітря і високу вологість органічної сировини використовує для розрахунку регульованих параметрів (заповнення газгольдера, витрату продуктів термічної деструкції, температуру протікання процесу термічної деструкції та складу її продуктів) та керуючих впливів автоматизованої системи керування у вигляді: витрати органічної сировини, повітря, рециркуляційних продуктів термічної деструкції, для компенсації зовнішніх збурень (задана витрата продуктів термічної деструкції та склад органічної сировини) що дало можливість підвищити продуктивність та конкурентоспроможність автоматизованої системи керування.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблений метод синтезу моделі об'єкта керування у вигляді системи диференціальних рівнянь, застосовуючи метод апроксимації Паде з використанням експериментальних даних, був успішно реалізований у вигляді програмного забезпечення. Цей метод дозволяє ефективно описувати поведінку об'єкта керування та враховувати його динаміку.

Також був розроблений метод керування термодеструкцією органічної сировини з метою досягнення певної витрати продукт-газу при зміні витрати синтез-газу та складу вихідної сировини. Цей метод дозволяє ефективно регулювати процес термодеструкції для отримання необхідного обсягу продукт-газу при змінних умовах виробництва.

В результаті була створена автоматизована система керування для установки термодеструкції, яка дозволяє стабілізувати технологічний процес отримання продукт-газу на заданих значеннях параметрів. Це значно спрощує та покращує процес виробництва, забезпечуючи більшу точність та стабільність у виробничому процесі.

Матеріали дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес Національного університету «Одеська політехніка» кафедри програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій в дисциплінах «Структурна та параметрична оптимізація», «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів», «Динаміка теплових процесів», «Моделювання теплоенергетичного обладнання в АСУ»

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, викладені в дисертації, отримані автором самостійно. Автору належать основні ідеї в удосконаленні методів і моделей комп'ютерно-інтегрованої системи керування термодеструкцією органічних речовин в установці, що використовує сировину різного походження та складу, з визначенням цього складу на основі вимірювання технологічних параметрів продуктів термодеструкції, з подальшим використанням інформації в контурах керування для забезпечення максимального ступеня газифікації вихідної сировини за максимальної теплотворної здатності продукт-газу.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

у [12], [16] – математична модель і результати розрахунку визначення складу продуктів термодеструкції органічних речовин;

у [12], [17–18] – модель і метод розв'язання процесу газогенерації в комбінованому ГГ при відомому складу вихідних вуглеводневих речовин;

у [13] – метод пошуку рішення задачі інтерпретації (метод бібліотеки) заміряних технологічних параметрів процесу горіння продуктів термодеструкції органічної сировини на базі використання даних робочого масиву

у [14] – алгоритм побудови апроксимаційної моделі об'єктів керування, апроксимаційна модель динамічних властивостей газопроводу, що подає газ на спалювання в енергетичному котлі;

у [15] – метод управління об'ємом продуктів згоряння (димових газів) і, відповідно, ККД котла при зміні його навантаження за рахунок підмішування до вихідного газоподібного пального газоподібних продуктів термодеструкції органічної сировини.

Апробація результатів роботи.

Результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися і отримали схвалення на:

– The 22th International scientific and practical conference “Modern theories and improvement of world methods” (June 06–09, 2023) Helsinki, Finland. International Science Group. 2023. p. 440-443. [URL:https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22](https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22)

– XVII Міжнародної науково-технічної конференції 84 «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», 27–28 квітня 2021 р. Харків.
<https://web.kpi.kharkov.ua/turbine/wp-content/uploads/sites/100/2021/10/Konferentsiya-tezisy-2021.pdf>

– IX Наукова конференція «НАУКОВІ ПІДСУМКИ 2020 РОКУ». Харків, Технологічний Центр, 2020.
<https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/8214/1/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%81%D1%83%D0%BC%D0%BA%D0%B8%202020.pdf>

Публікації. Результати наукових досягнень викладені в 8 друкованих працях, з них 5 – у спеціалізованих наукових виданнях (у тому числі 3 реферуються в системі SCOPUS), 3 – доповіді і тези доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел з 135 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 188 сторінок (з них 165 – основного тексту), 42 рисунків, 31 таблиць та 2 додатків.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ ТЕРМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН РІЗНОМАНІТНОГО ПОХОДЖЕННЯ ТА СКЛАДУ

1.1 Джерела органічних відходів

У сучасному світі енергетика стала критично важливою як для побутових споживачів, так і для об'єктів критичної інфраструктури. Безперебійне теплопостачання є необхідним як для забезпечення комфорту у житті, так і для забезпечення роботи важливих об'єктів, таких як шпиталі чи промислові підприємства. Багато теплових електростанцій в Україні працюють на газі як основній сировині [1]. Але існує серйозний ризик у використанні газу як головного джерела енергії. Значна частина поставок газу до країни залежить від політичних відносин з постачальниками, що може призвести до енергетичних криз та втрати контролю над постачанням. Також, наявність альтернативних джерел енергії, таких як вітро- та сонячна енергія, обмежена через недостатню розвиненість інфраструктури.

У зв'язку з цим, дослідження альтернативних джерел енергії стає надзвичайно важливим завданням. Використання альтернативних енергоносіїв може зменшити залежність від імпортованого газу та забезпечити більшу стабільність в енергетичному секторі країни. Як альтернативні енергоносії можуть бути використані відходи органічного походження. Серед них особливу увагу заслуговують відходи біомаси та побутові відходи.

Відходи біомаси

Біомаса включає в себе органічні матеріали, що залишаються від сільського господарства, лісового господарства, а також відходи харчової промисловості. Відходи біомаси мають великий потенціал для виробництва енергії завдяки їх високій калорійності та можливості використання різними способами.

Основні переваги відходів біомаси як альтернативного енергоносія включають:

- *Відновлюваність*: Біомаса є відновлюваним ресурсом, який може постійно поповнюватися завдяки сільськогосподарським та лісгосподарським діяльностям;
- *Зменшення викидів парникових газів*: Використання біомаси для виробництва енергії сприяє зниженню викидів CO₂, оскільки рослини під час свого росту поглинають цей газ з атмосфери;
- *Економічна вигода*: Переробка біомаси на енергію може стати додатковим джерелом доходу для фермерів та підприємств аграрного сектору.

Побутові відходи

Побутові відходи - це відходи, що утворюються в результаті повсякденної діяльності людини. Вони включають органічні відходи, такі як залишки їжі, папір, текстиль та інші біорозкладні матеріали. Ці відходи також мають значний потенціал для виробництва енергії. Основні переваги використання побутових відходів як альтернативного енергоносія:

- *Скорочення обсягу сміття*: Переробка побутових відходів на енергію допомагає зменшити обсяг сміття, що потрапляє на сміттєзвалища, тим самим знижуючи навантаження на навколишнє середовище;
- *Отримання додаткових ресурсів*: Побутові відходи можуть бути джерелом не тільки енергії, а й інших корисних матеріалів, що можна використовувати повторно;
- *Зменшення залежності від викопних видів палива*: Використання побутових відходів для виробництва енергії допомагає зменшити споживання нафти, газу та вугілля, що сприяє екологічній стійкості.

Відходи біомаси та побутові відходи мають великий потенціал як альтернативні енергоносії. Їх використання не тільки сприяє зменшенню залежності від традиційних джерел енергії, а й допомагає вирішити екологічні проблеми, пов'язані з відходами. Запровадження технологій переробки органічних відходів на енергію є важливим кроком на шляху до сталого розвитку.

1.2 Джерело відходів біомаси

1.2.1 Потенціал рослинної біомаси в Україні

У 2020 році Україна виробила понад 70 мільйонів тонн агропродукції, яка створює потенціал для використання відходів агропромисловості як джерела альтернативних джерел енергії [2]. В роботі, заснованій на даних [3], розглядається статистична модель для оцінки кількості та енергетичної цінності (в термінах питомої теплоти згоряння) соломи та інших решток, отриманих з залишків врожаю різних видів культур. Серед цих культур - пшениця, озима пшениця, ярова пшениця, просо, жито, вівсо, кукурудза, гречка, рож, соняшник, соя, рис і ріпак.

В табл. 1.1 дані про урожайність (ц/га) жито, пшениця, просо, горох, ячмінь, овес, гречка, кукурудза, соняшник за 2015-2020 роки.

Таблиця 1.1 – Урожайність(ц/га) полів в 2015-2020 роках

Культура/рік	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Пшениця	39,4	41,4	49.7	36.9	40.6	36.5
Кукурудза	49,6	64	37.9	63.3	53.8	53.1
Ячмінь	31,0	33,5	45.9	30.9	42.1	33.0
Жито	27,1	29,5	29.4	29.6	30.2	32.8
Овес	24,0	25,2	24.6	23.2	24.8	23.9
Гречка	11,4	12	10.4	13.4	12.8	12.4
Просо	21,3	18,0	16.2	13.7	19.2	17.2
Горох	22,2	28,1	37.5	18.7	23.0	20.8
Соняшник	23,4	21,3	19.0	22.4	24.3	19.3

В табл. 1.2 Площа (тис.га) засіяних полів.

Таблиця 1.2 – Зібрана площа за 2015-2020 роки

Культура/рік	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Пшениця	25773	23836	19213	25601	27168	25024
Кукурудза	3871	8936	3049	4686	1464	4788
Ячмінь	11109	11407	8457	9783	10722	9165
Жито	524	522	469	498	1854	484
Овес	681	685	549	611	525	575
Гречка	299	351	322	226	267	311
Просо	288	275	126	132	216	289
Горох	758	955	1234	1712	1304	627
Соняшник	9736	9973	9634	10822	15374	11479

З метою оцінки кількості соломи, отриманої протягом періоду 2015-2020 років, були використані дані з табл. 1.1 і 1.2. Отримані оціночні дані про кількість соломи. Отримані результати наведені в таб. 1.3 і виражені у тисячах тон.

Таблиця 1.3 – Кількість соломи (в тисячах тон) з різних культур за 2015-2020 роки.

Культура/рік	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Пшениця	25773	23836	19213	25601	27168	25024
Кукурудза	3871	8936	3049	4686	1464	4788
Ячмінь	11109	11407	8457	9783	10722	9165
Жито	524	523	469	498	1854	484
Овес	681	685	549	610	525	575
Гречка	299	351	322	226	267	311
Просо	288	275	126	132	216	289
Горох	758	955	1234	1712	1304	627
Соняшник	9736	9973	9634	10822	15374	11479

У наш час використання соломи для енергетичних цілей набуває все більшого значення. Проте важливо враховувати, що лише обмежена частина соломи може бути використана для виробництва енергії, оскільки частина її використовується в тваринництві наприклад для корму свійських тварин або як добриво. У дослідженні [19] була проведена оцінка доступної кількості соломи для використання у виробництві енергії, а також розраховано коефіцієнт енергетичного використання K_{en} для різних видів сільськогосподарських культур. Проте варто враховувати, що при зборі та транспортуванні соломи виникають невідворотні втрати. Ці втрати позначаються коефіцієнтом K_{los} . Отже, як показано в дослідженні [20], для ефективного використання соломи у виробництві енергії необхідно враховувати обидва ці коефіцієнти: K_{en} та K_{los} .

Для визначення енергетичного потенціалу різних культур зібрано дані про вміст вологи, целюлози та лігніну, оскільки ці компоненти відіграють ключову роль у формуванні енергії [21]. Умовні формули для перерахунку на один атом вуглецю були отримані на основі цих даних. Табл. 1.4 містить інформацію про вміст целюлози, вологи та лігніну для різних культур.

Варто відзначити, що геміцелюлози представляють собою різноманітну групу складних сполук, чиї відсоткові складові варіюються від рослини до рослини. У даній роботі аналіз вмісту геміцелюлози не проводився.

Таблиця 1.4 – Вміст лігніну, целюлози, та вологи

Культура	Лігнін (%)	Целюлоза (%)	Геміцелюлоза (%)	Волога (%)
Пшениця	24,7	31,47	21	6,9
Ячмінь	21,7	38,0	37,2	6,9
Жито	30,9	21,5	21,5	5,5
Гречка	17,0	42,1	8,4	4,9
Соняшник	10,8	37,6		7,1
Горох	12,6	46,5	17,8	3,3

Враховуючи той факт, що біомаса містить значну кількість вуглецю та водню, виключення цих складових з розрахунків може призвести до надання консервативної, песимістичної оцінки її енергетичної цінності. Виконавши розрахунки, подібні [22], отримано відповідні умовні формули (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Умовні формули

Культура	Умовна формула
Пшениця	$C H_{1.18} O_{0.82}$
Ячмінь	$C H_{1.29} O_{0.84}$
Жито	$C H_{1.34} O_{0.83}$
Гречка	$C H_{1.64} O_{0.94}$
Соняшник	$C H_{1.18} O_{0.82}$
Горох	$C H_{1.4} O_{0.82}$

З урахуванням даних з табл. 1.5 за формулою Менделєєва [23] отримано дані нижчої теплоти згорання Q_n (табл. 1.6).

Таблиця 1.6 – Нижча теплота згорання

Культура	Q_n (кДж/кг)
Пшениця	14510
Ячмінь	13520
Жито	15500
Гречка	12520
Соняшник	14650
Горох	12650

1.2.2 Використання соломи як джерело енергії

Солома, як паливо, має декілька переваг, зокрема свою вуглецеву нейтральність. Вона часто використовується як місцеве паливо у сільському господарстві, що значно спрощує логістику доставки порівняно з іншими видами палива [24], такими як вугілля, торф або газ. Особливо важливою є той факт, що солома є відходом аграрного сектору, що робить її логістично зручним і доступним джерелом енергії.

Існують дві основні категорії способів отримання енергії з соломи: безпосереднє спалювання і спалювання продуктів термічної обробки соломи, такого як піроліз. Однак, використання соломи має свої недоліки та проблеми, такі як неоднорідність матеріалу [25], високий вміст шкідливих летючих речовин [26] та обмежений діапазон вологості [27].

Розв'язання проблеми використання соломи як джерела енергії вимагає широкого спектру технічних, програмних, апаратних і технологічних рішень. Способи добування енергії з соломи можна умовно поділити на безпосереднє спалювання соломи з мінімальною обробкою та спалювання продуктів термічної обробки, таких як піроліз і газифікація.

Спалювання соломи може бути здійснене кількома способами, включаючи автоматичне та ручне завантаження горючого матеріалу. У випадку ручного завантаження зазвичай використовують пристрої, що представляють собою жаротрубні котли з великою топкою, оточеною водяною сорочкою. В залежності від потужності, топка котла може бути пристосована для спалювання малих, циліндричних або великих тюків соломи.

На сучасному ринку широко представлені пристрої для спалювання біомаси, включаючи соломку, з автоматичною подачею. Один з прикладів такого пристрою - котел для спалювання солом'яної біомаси Vesko-S, виробництва фірми TTS Boilers [28]. Цей котел відноситься до категорії пристроїв для спалювання біомаси без необхідності передпопередньої обробки.

Компанія Hurst Boiler розробила інноваційне рішення у вигляді котла Hybrid RG [29], яке відрізняється від інших. Висока ефективність цього пристрою забезпечується за рахунок трьох основних факторів [30]. Перш за все, це досягнення

максимально можливої одноманітності складу палива за рахунок його подрібнення. Далі, створюється дефіцит повітря в нижній частині камери згорання за допомогою вентилятора 5, і його надлишок в верхній частині за рахунок вентилятора 7. Ці пропорції повітря відіграють ключову роль у перехідному процесі від горіння до термічного розкладу з утворенням летких сполук, тобто газифікації.

Принцип роботи котла, описаний у джерелі [29], ґрунтується на ідеях, викладених у джерелі [30], а також на інших дослідженнях, наприклад, у джерелах [31], [32], які підтверджують доцільність використання біомаси як ресурсу для виробництва більш калорійних палив через процес газифікації чи піролізу. Важливим аспектом, який підкреслюється у джерелі [28], є необхідність вирішення проблеми неоднорідності біомаси з метою підвищення ефективності процесу конверсії біомаси з одного боку та забезпечення надійності й довговічності відповідних пристроїв з іншого.

1.2.3 Термодеструкція та спалювання продуктів термодеструкції соломи.

Управління процесом термодеструкції біомаси

Отримання енергії з соломи шляхом піролізу є одним з перспективних напрямків використання біомаси. Цей процес полягає в перетворенні біомаси, у даному випадку соломи, в газ та рідке паливо, які подальше можна використовувати для енергетичних потреб. Однак цей процес включає в себе кілька технічних та технологічних викликів. Однією з головних проблем при піролізі соломи є видалення золи з реактору, що є важливим кроком для підтримки ефективності та тривалості роботи системи. Для цього були розроблені технології, такі як CFB (циркулюючий рідкий дно) та LTCFB (низькотемпературний циркулюючий псевдозріджений шар). У процесі CFB, біомаса конвертується в газ, який потім може бути спалений у пічній установці для виробництва енергії. Ця технологія дозволяє ефективно видаляти золу з пічної камери, що робить можливим використання різних видів палива без ризику корозії або утворення нальоту. Технологія LTCFB є подальшим розвитком CFB, зосереджуючись на піролізі при низькій температурі. В цьому випадку біомаса перетворюється в газ піролізу та кокс, який далі

газифікується для отримання енергії. Цей процес забирає менше часу, оскільки газифікація коксу відбувається в окремому реакторі. Таким чином, технології CFB та LTCFB відкривають шляхи для більш ефективного та стабільного використання біомаси, зокрема соломи, для отримання енергії. Ці підходи дозволяють знизити ризики та витрати на виробництво енергії, сприяючи при цьому більш екологічному та сталому енергетичному виробництву.

Управління системами можна описати як процес знаходження такого закону управління, який забезпечує стабільність системи під впливом зовнішніх збурень, при цьому мінімізуючи похибки як у стаціонарному режимі, так і під час перехідних процесів. Ідеальний закон управління повинен точно відтворювати динаміку системи у відповідь на вхідний сигнал, при цьому не вводячи затримок.

Хоча такий ідеальний закон управління у практиці неможливий, існує багато методів вирішення задач управління. Їх можна розділити на керування за станом, керування за похибкою та релейне керування. У технологічних процесах релейне керування використовується рідко через високе навантаження на систему, спричинене постійними перехідними процесами.

Керування за похибкою часто виконується за допомогою П, ПІ, ПД чи ПІД регуляторів, з яких найпопулярнішим на сьогоднішній день є ПІ регулятор [32]. Цей метод забезпечує добру якість управління при мінімальній інформації про систему. Проте, його основним недоліком є емпіричність, що ускладнює процес налаштування регулятора та оцінювання часу, необхідного для його розробки, що є важливим фактором в промисловості.

1.2.4 Технологічні схеми піролізу біомаси

Рослинна біомаса використовується для енергетичних цілей шляхом застосування фізичних та термохімічних процесів конверсії. Серед технологій конверсії найпоширенішою є технологія прямого спалювання. Під час цього процесу, який відбувається при високій температурі, відбуваються складні фізико-хімічні процеси, такі як сушіння, прогрівання та взаємодія з повітрям.

Спалювання рослинної біомаси відбувається при температурі 1500-2000 °C і включає в себе ряд процесів, таких як видалення вологи, вихід летких речовин та утворення газів, водяної пари та золи. Кожен вид палива має свою унікальну специфіку, оскільки процеси сушіння, прогрівання та згоряння відбуваються з різною швидкістю, тривалістю та умовами. Наприклад, під час згоряння пиловидного палива більшість часу припадає на процес виходу летких, а лише невелика частина на виходження коксу. Однак інтенсивність тепловиділення під час виходу летких виявляється значно вищою, ніж під час згоряння коксу. Такі особливості впливають на загальний процес згоряння різних видів палива. Перебіг процесу згоряння твердого палива значно впливається рядом факторів, серед яких основним є правильний повітряний режим у топці. Але часто саме це стає основною перешкодою перед ефективним спалюванням. Ще однією проблемою при спалюванні рослинної біомаси, особливо міських деревних відходів, є самі відходи. Вони зазвичай складаються з різних порід деревини (наприклад, листяних, хвойних) та малоцінних видів дерев (таких як тополя, осика, вільха тощо), мають широкий спектр фракційного складу та високий вміст вологи (до 55-60%).

Висока вологість відходів призводить до значного зменшення теплоти згоряння, більш ніж в 5 разів, що ускладнює процес спалювання. Це призводить до ряду технічних труднощів, серед яких можна відзначити необхідність забезпечення надійного горіння палива з мінімальним надлишком повітря, проблеми поліфракційності та нестабільного складу палива та його характеристик з плином часу.

Утилізація рослинної біомаси для виробництва енергії в Україні вимагає не лише спеціальної техніки та технологій спалювання, але й підготовки палива для поліпшення теплотехнічних показників. Існує різноманіття топкових пристроїв для різних видів біомаси, таких як шарові топки для більших деревинних дріб'язків, камерні або вихрові для дрібної фракції. Проте жоден із них не є ідеальним, оскільки виникають труднощі з певними видами біомаси та недопалом. Таким чином, технічні обмеження перешкоджають повній ефективності використання біомаси. Ця проблема почасти пояснюється "газовим бумом" в минулому столітті, коли більшість

енергетичного обладнання перейшла на природний газ. Існуючі твердопаливні котли були видалені, а їх виробництво руйнувалося. Вартість імпортової техніки висока, що ускладнює заміну. Більшість теплоенергетичних установок в Україні зараз працюють на природному газі, що робить їх непридатними для спалювання твердої біомаси через технічні обмеження.

Технологія, яка дозволяє використовувати біомасу безпосередньо в існуючих теплоенергетичних установках, розглядається як найбільш перспективна для широкого застосування біомаси в теплоенергетиці. Це відкриває можливості для ефективного використання існуючого парку теплоенергетичних установок, збільшення енергобезпеки, зменшення використання копалинних палив і зменшення викидів шкідливих речовин. Один з перспективних шляхів адаптації існуючого теплоенергетичного обладнання до використання рослинної біомаси як альтернативного палива полягає у її попередній конверсії. Ці технології включають в себе високотемпературні тепло-технологічні процеси, які фізико-хімічно перетворюють органічне паливо в нові газоподібні, рідкі та тверді енергетичні продукти.

Процеси термохімічної конверсії мають кілька переваг, серед яких важливо виділити наступні аспекти. По-перше, ці процеси дозволяють конвертувати різноманітну рослинну біомасу незалежно від її хімічного складу, вмісту золи, сірки, вологості та інших домішок. Це робить їх універсальними і практично застосовними для будь-яких видів біомаси. По-друге, такі процеси дозволяють отримувати різноманітні види палива, включаючи тверде і рідке паливо або горючий газ певного складу. Це відкриває можливості для їх використання у різних енергетичних установках. По-третє, їх можна масштабувати, щоб забезпечити паливом як великі промислові підприємства або населені пункти, так і невеликі автономні енергетичні або хімічні об'єкти.

За способом підведення додаткової теплоти, піролізні процеси можна розділити на три типи. Перший тип включає процеси з зовнішнім підведенням тепла через стінку апарату. Це можуть бути реторти періодичної дії вагонного типу, або реторти абеляційного піролізу. У таких апаратах можна обробляти будь-які види твердої

рослинної біомаси. Однією з переваг такого підходу є відсутність розбавлення газової фази баластними компонентами. Однак такий спосіб підведення тепла може призводити до громіздкості апаратурного оформлення і низької енергетичної ефективності через складнощі рівномірної передачі тепла до палива по товщині шару. Другий тип використовує внутрішнє обігрівання, коли тепло для проведення термічного розкладу отримують за рахунок спалювання частини вихідного палива, що завантажується в апарат. При цьому швидкість горіння і температура процесу регулюються кількістю повітря, що надходить в апарат. Такий принцип обігрівання застосовується, наприклад, в печах Хоррешоффа. Ці різні методи підведення тепла мають свої переваги і недоліки, які потрібно враховувати при виборі оптимального варіанту для конкретних умов і завдань.

1.3 Утворення твердих побутових відходів

У 1960-х роках Франція, ФРН та Швейцарія стали першопрохідцями в галузі переробки твердих побутових відходів (ТПВ), інвестуючи в розробку технологій утилізації [33]. На Міжнародній конференції ООН у Ріо-де-Жанейро 1992 року була прийнята Декларація з Охорони Навколишнього Середовища і Розвитку, де була визначена світова політика стосовно безпечної та екологічно прийнятної утилізації ТПВ. Вимоги до технологій переробки включають ефективність, безпеку та екологічність через методи повторного використання, сортування та утилізації [34–36].

Дослідження [35] показали, що накопичення відходів у країнах, які розвиваються, має негативний вплив на глобальну стійкість навколишнього середовища. Прогнозується, що до 2025 року міські агломерації будуть генерувати 1,3 мільярда тонн ТПВ щорічно [4]. Відкрите полігонне зберігання ТПВ в розвинених країнах вважається неприйнятним через його негативний вплив на довкілля, включаючи локальні повені, забруднення землі, води та повітря [4]. Для вирішення цих проблем Великобританія, США, Японія та Італія впровадили безвідходне муніципальне управління ТПВ [37], що включає технології термічної

утилізації [5] та повторного використання [6]. Аналіз джерел та статистичної інформації дозволив сформулювати порівняльну табл. 1.7, яка ілюструє різноманітні підходи до управління ТПВ у різних країнах.

Таблиця 1.7 – Частка методів утилізації ТПВ

Технології утилізації	Країни								
	США	Велика Британія	Франція	ФРН	Австрія	Італія	Україна	Японія	Південна Корея
Термічна	17	7	37	21	73	13	6	70	18
Полігонна	81	92	53	73	19	84	94	17	79
Компостна		1	10	6	7	3		1	2
Інші	2				1			12	1

У світі одним з найпоширеніших методів утилізації твердих побутових відходів є їх захоронення на полігоні. Проте, спалювання є більш ефективним способом, оскільки дозволяє значно зменшити обсяг відходів і одночасно отримувати теплову енергію, що дозволяє мінімізувати негативний вплив на довкілля. Однак при цьому виникають високотоксичні органічні сполуки, що можуть бути шкідливими для навколишнього середовища. У зазначеному контексті важливо розглянути процес утворення ТПВ, їх склад та класифікацію за ступенем небезпеки для довкілля під час термічної переробки. Такий аналіз дозволить визначити найбільш оптимальні технології для утилізації та мінімізації негативного впливу на природне середовище.

Відходи розглядаються з двох протилежних позицій: як забруднення, що негативно впливає на природу, і як вторинні ресурси, які можуть бути перероблені для подальшого використання. Утилізація відходів означає їхнє використання як вторинних матеріалів або джерел енергії.

Стандартом ДСТУ 3910-99 визначено класифікацію відходів та правила їх категоризації, що визначають методи поводження з ними. У роботі ТПВ розглядаються як предмети або товари для побуту, які втратили споживчі властивості і які представляють собою біологічні та небіологічні тверді відходи.

Дослідження [38–40] показують обсяг утворення ТПВ на одну людину протягом року у різних країнах Європейського Союзу. Табл. 1.8, сформована на основі цих досліджень, відображає ці дані.

Таблиця 1.8 – Обсяг утворення ТПВ в деяких країнах ЄС.

Країна	ТПВ	
	Збираються за рік, млн. т	Питомий показник, на 1-го чол. в рік, в кг
Австрія	5,70	418
Бельгія	4,35	492
Угорщина	4,70	463
Німеччина	20,50	587
Данія	3,20	820
Ірландія	3,20	730
Іспанія	22,70	609
Італія	32,50	540
Нідерланди	9,30	599
Португалія	4,60	452
Фінляндія	2,50	822
Франція	28,00	570
Чехія	4,64	316
Швейцарія	2,70	352
Швеція	4,20	471

У країнах, які відмовилися від полігонів ТПВ, таких як Швейцарія, Швеція та Німеччина, спостерігається велика увага до альтернативних методів утилізації відходів. Вони активно інвестують у сортування, спалювання та переробку відходів. У порівнянні з ними, країни, які переважно використовують полігони для утилізації відходів, такі як Румунія, Польща, Чехія, Латвія, Угорщина та Литва, мають низький рівень використання сучасних методів утилізації.

Наприклад, у Німеччині, Швейцарії та Швеції переробка відходів становить від 32,6% до 46,6% від загальної кількості відходів у цих країнах. У той час як у інших країнах цей показник значно нижчий, коливаючись від 16,6% до 25%. Наприклад, у Румунії лише 6% відходів підлягають переробці. Це свідчить про різницю у підходах до утилізації відходів між розвиненими країнами та тими, які ще не впровадили сучасні методи управління відходами.

У 2017 році в Україні, за даними Мінрегіону, було накопичено близько 52 мільйонів кубометрів або 10 мільйонів тонн побутових відходів. Ці цифри не включають дані з Автономної Республіки Крим, міста Севастополя та тимчасово окупованих територій. Проте лише близько 6,6% цих відходів було перероблено або утилізовано. З них 2,48% було спалено, а 4,18% відправлено на заготівельні пункти вторинної сировини та заводи переробки ТПВ. Решта відходів була захоронена або вивезена на стихійні сміттєзвалища.

Переробка ТПВ стає все більш актуальною проблемою для України. Українські екологи-науковці демонструють, що кількість твердих побутових відходів в країні зростає щорічно. Полігони для сміття, які знаходяться поза межами міст, переповнені, що є серйозною проблемою. Утилізація відходів у міських комунальних підприємствах стоїть перед дуже гострою проблемою і періодично призводить до надзвичайних ситуацій.

1.3.1 Структура ТПВ

У відкритих джерелах не було знайдено результатів систематичних досліджень морфологічного складу ТПВ для умов України. Інформація про склад ТПВ базується головним чином на обмежених дослідженнях, проведених операторами сміттєзвалищ та відповідними асоціаціями на певних територіях із відмінними результатами. Наприклад, результати досліджень, проведених у рамках національного проекту "Чисте місто" [7], показали, що найбільшу частку у складі ТПВ становлять продукти харчування (понад 30% від загального обсягу) та упаковка, переважно з картону і паперу.

До складу ТПВ входять такі компоненти [41]:

- Харчові відходи — 35-50%;
- Папір і картон — 10-15%;
- Полімери — 9-13%;
- Скло — 8-10%;
- Метали — 2%;
- Текстиль — 4-6%;

- Будівельні відходи — 5%;
- Деревина — 1%;
- Інші відходи — 10%.

Розбіжності в даних, ймовірно, зумовлені обмеженим обсягом вибірки і різними методологіями досліджень.

Основаючись на даних Державного підприємства "Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства України", склад твердих побутових відходів можна проілюструвати за допомогою табл. 1.9.

Таблиця 1.9 – Склад ТПВ [41]

Склад за масою, %															
Харчові відходи	Шкіра, резина	Картон	Папір	ПЕТФ тара	Упаковка	Кольорові метали	Чорні метали	Скло	Текстиль	Пластмаса	Мин. залишок	Залишок органіки	Деревина	Небезпечні ТПВ	Полімерна плівка
39	1	5	8	2,1	1	0,2	1	13	2	3	4,3	14,7	1	0,02	2,1

Таблиця 1.10 – Склад ТПВ муніципальних підприємств і житлових комплексів

Склад	ТБО, % за масою	
	Муніципальні підприємства	Житлові комплекси
Харчові відходи	13...16	27...37
Папір, картон	45...52	37...41
Деревина	3...5	1...2
Черні метали	3...4	3...4
Кольорові метали	1...2	1...2
Текстиль	3...5	3...5
Кістки	1...2	1...2
Скло	1...2	2...3
Шкіра, резина	2...3	0,5...1
Силікатні матеріали	6...9	7...9
Пластмаса	8...12	5...6

Сьогоднішні дані свідчать про збільшення вмісту кольорових металів у ТПВ через наявність алюмінієвих банок та пластмасових упаковок, зокрема ПЕТФ-

пляшок. Така тенденція супроводжується зменшенням частки легко розкладаючихся органічних відходів, зокрема харчових залишків [42–44].

Відходи, що формуються у житловому секторі та на комунальних підприємствах, мають відмінності у складі, що підтверджується даними, наведеними в табл. 1.10. Вологість є важливою фізичною характеристикою ТПВ, що визначає його енергетичну цінність. Відповідні дані представлені в табл. 1.11.

Таблиця 1.11 – Вологість ТПВ

Склад	Вологість, % від загальної маси			
	Весна	Літо	Осінь	Зима
Загальна вологість	32,4	41,2	53	31,7
Деревина	30	10	22	22,7
Папір	28,4	26,4	29	26
Картон	13,2	0	28,3	14
Текстиль	13	25	35,2	17,7
Метал	0,6	0,6	0,8	1,5
Шкіра, резина	5,7	0,3	4,3	11,4
Кістки	22	18,6	27,8	23
Харчові відходи	64	60	92	75,5
Силікатні матеріали	5	3	0	1

1.3.2 Енергетичні технології переробки ТПВ

Це відомо, що технології енергетичної переробки твердих побутових відходів мають значний вплив на екологію та сталість ресурсів. До них відносяться декілька методів, зокрема, спалювання на механічних колосникових решітках в шарових топках, спалювання в киплячому шарі, спалювання в барабанних печах, а також використання у цементних печах як додаткового палива [8].

Зазначена остання технологія є популярною в Європі, де використовується понад 350 тисяч тон ТПВ щорічно. Однак, серед дослідників також виділяється метод піролізу як ефективний спосіб утилізації ТПВ [9].

Піроліз, як метод, має кілька переваг, зокрема, він є безвідходним, оскільки перетворює отруйні сполуки в горючі або інертні матеріали. Крім того, цей метод дозволяє акумулювати газ та передавати його споживачам за потребою, а також спільно переробляти побутові та промислові відходи. Важливо також відзначити, що

для ефективної роботи піролізу важливий правильний відбір утильних фракцій та попередня сортування ТПВ. Це допомагає покращити умови їхньої термічної та біотермічної переробки.

У Європейському Союзі реалізується стратегія термічної переробки ТПВ, де випромінена енергія перетворюється в тепло для споживачів або електроенергію. Згідно з [10], процес термічної переробки вважається утилізацією, якщо енергетична ефективність перевищує 0,65. Проте, [45] зазначає, що близько 60% з 420 установок ЄС мають енергоефективність менше 0,6.

У випадку, якщо установка видає електроенергію зовнішнім споживачам або комбінує відпуск тепла та електрики, і має енергетичну ефективність $E=0,65$ і вище, вона вважається енергогенеруючою установкою з термічної переробки відходів. Така стратегія стає економічно доцільною лише в разі, якщо прибуток від продажу електроенергії компенсує витрати на придбання, розташування та обслуговування електрогенеруючого обладнання.

Піроліз.

Піроліз – це процес термічного розкладання твердих палив без доступу повітря, який дає можливість отримати газоподібні продукти. Багато вчених вважають, що цей процес не набув широкого поширення через технологічні труднощі, зокрема у регулюванні та керуванні ним. Побутові відходи містять хлор і фтор у формі пластмас, що ускладнює процес термічного розкладання, оскільки при цьому утворюються небезпечні, шкідливі та отруйні речовини. Однак не зважаючи на існуючі докази і факти, існує і протилежна думка.

Далі, під піролізом або газифікацією твердих палив розуміють необоротну хімічну зміну їх компонентів під впливом тепла при відсутності окиснювача, що призводить до утворення хімічних сполук. Сировина для такого процесу може бути різноманітною за хімічним складом, тому неможливо очікувати вибіркового утворення конкретних сполук.

Піроліз - це процес термічного розкладання органічних матеріалів при високих температурах без доступу повітря. В залежності від температурного режиму

виокремлюють низькотемпературний, середньотемпературний та високотемпературний піроліз.

Низькотемпературний піроліз відбувається при температурі 400–600 °C і характеризується мінімальним виділенням газу та максимальним утворенням рідких та твердих продуктів, таких як смоли, олії і тверді залишки. Середньотемпературний піроліз, який проводиться до 900 °C, призводить до значного збільшення кількості отриманого газу. Високотемпературний піроліз, що відбувається при температурі 900–1200 °C, характеризується максимальним виділенням газу та мінімальним утворенням рідких та твердих продуктів.

Кожному температурному рівню відповідає власна технологічна схема, в якій основним елементом є шахтна піч і система зв'язування хімічно активних і забруднюючих сполук. Під час піролізу в печі утворюється вуглецевий залишок, в якому знаходяться забруднюючі речовини в зв'язаному стані, та пірогаз, який складається з продуктів розкладання органічних матеріалів. Деякі науковці вважають, що піроліз є екологічно чистим методом обробки відходів. Цей процес може забезпечити ефективну утилізацію відходів і перетворити їх енергетичний потенціал для використання в енергетичних технологіях. Крім того, за допомогою піролізу можна запобігти викидам шкідливих речовин, оскільки вони будуть зв'язані в вуглецевому залишку.

Спалювання ТПВ в установках з механічними колосниковими решітками.

Топки з шаровим спалюванням твердих палив є одними з найбільш поширених у світовій практиці сьогодення. Вони відрізняються за типом і принципом роботи колосникових решіток. Існує кілька типів механічних решіток, які застосовуються у цих топках. Перш за все, варто зазначити перештовхуючі колосникові решітки. Цей тип решіток має кілька варіацій, серед яких похило-перештовхуючі та зустрічно-перештовхуючі. У похило-перештовхуючих решіток паливо зсувається під дією відпрацьованих газів, що створює ефектний процес згоряння. Зустрічно-перештовхуючі решітки забезпечують більш ефективне використання тепла шляхом максимальної контактної площі між паливом і гарячими газами. Другим типом механічних решіток є назад-перештовхуючі. Цей принцип базується на зворотньому

руху горіння, що сприяє збільшенню тривалості контакту між паливом і тепловими джерелами, підвищуючи ефективність спалювання. Третій тип - валкові колосникові решітки. Вони працюють на основі прокатування палива на спеціальних валах, що забезпечує його подрібнення і оптимальний контакт з повітрям, що сприяє швидкому та повному згоранню. Загалом, ці різновиди механічних решіток в ТПВ відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного та екологічно чистого процесу згорання твердих палив.

Спалювання в киплячому шарі.

Процес спалювання в киплячому шарі має свою особливість - ефект псевдокипіння ТПВ. В цьому процесі інертний матеріал, яким зазвичай є кременистий пісок, використовується для утворення висхідного потоку. Цей матеріал має велику теплоємність, що стабілізує температуру процесу незалежно від змін у вмісті і якості відходів, що завантажуються. Інтенсивне кипіння шару призводить до енергійного перемішування відходів, окиснювача і продуктів згорання, що сприяє інтенсивному запалюванню, що є перевагою цього типу топок. Турбулентне перемішування і інтенсивна теплопередача, що відбуваються в киплячому шарі, дозволяють зменшити кількість надлишкового повітря, необхідного для повного згорання ТПВ, що в свою чергу зменшує витрату димових газів. Топки з киплячим шаром можуть мати різні модифікації, такі як топки з бульбашковим (стаціонарним) киплячим шаром, топки з циркулюючим киплячим шаром (з зовнішньою або внутрішньою циркуляцією) та топки з вихровим киплячим шаром.

Установки для спалювання відходів в бульбашковому киплячому шарі характеризуються низькими швидкостями (до 2,5 м/с) подачі повітря для спалювання та невисокими лінійними енергонапругами до 2 МВт/м. Зазвичай на таких установках спалюють спеціально підготовлені побутові відходи, осад стічних вод і відходи деревини. Однак аналіз установок, що спалюють непідготовлені тверді побутові відходи, які включають в себе топку з бульбашковим киплячим шаром, показує наявність проблем, що виникають під час експлуатації. Ці проблеми переважно пов'язані з підготовкою та транспортуванням сировини, вибором місця подачі відходів, охолодженням і видаленням золи.

Установки для спалювання ТПВ у циркулюючому киплячому шарі відрізняються особливою ефективністю та гнучкістю використання. Вони забезпечують швидкість повітря до 6 м/с та лінійну енергонапругу поверхні шару на рівні 7 МВт/м. Такі установки розробляються для підприємств, що виробляють котельне обладнання для вугільних теплоелектростанцій.

Циркулюючий киплячий шар дозволяє спалювати паливо з різними характеристиками без значних змін у конструкції котла. Це означає, що для різних видів вугілля, торфу, шламів та біомаси можна використовувати один і той же котел, просто адаптуючи його до конкретних умов. Проте для ефективного спалювання ТПВ у цих котлах необхідна попередня підготовка палива, включаючи подрібнення, видалення металевих та великих інертних матеріалів, а також ретельне перемішування. Якість цієї підготовки має вирішальне значення для надійності роботи всієї установки. Детальний опис процесу спалювання ТПВ у котлах з циркулюючим киплячим шаром, а також обзір різних модифікацій таких котлів, виготовлених різними підприємствами, можна знайти в [46].

Установки для переробки ТПВ в топках з вихровим киплячим шаром комбінують переваги класичної технології стаціонарного киплячого шару з плюсами циркулюючого киплячого шару. Ці установки можуть бути реалізовані як за принципом одновихрового, так і двовихрового киплячого шару. У випадку двовихрового киплячого шару, в нижній частині топкового пристрою формуються парні вихрові зони, які називаються вихровим киплячим шаром. В цих зонах відбувається основне горіння ТПВ за рахунок правильної подачі повітря. Киплячий шар складається з двох зон піску з еліптичним перетином, розташованих дзеркально відносно один одного і рухаються назустріч один одному. Ця організація спалювання забезпечує якісне поперечне перемішування матеріалу шару та створює необхідні умови для рівномірного розподілу температур і ефективного спалювання. Надлишок повітря в шарі підтримується близько одиниці, а догорання продуктів згорання відбувається в просторі над шарами, які перемішуються, і куди подається вторинне повітря. У результаті такого двоетапного спалювання зменшується утворення оксидів азоту, концентрація яких в димових газах знижується.

Спалювання в металургійних печах.

Технологія спалювання ТПВ в жужільному розплаві металургійної печі має низку переваг, які варто відзначити. Перш за все, цей метод забезпечує повне розкладання шкідливих сполук за рахунок високих температур, які досягаються в процесі плавлення металевого матеріалу. Це дозволяє ефективно видаляти токсичні речовини і забруднюючі елементи, знижуючи негативний вплив на навколишнє середовище. Більше того, існує ряд модифікацій цієї технології, які можуть бути застосовані в залежності від характеру процесу та вимог до обробки ТПВ. Ось деякі з них: використання доменних печей з додаванням вугілля, процес Ванюкова, збагачення киснем дуття, флюмінгпроцес, збагачення природним газом дуття, електрошлаковий розплав. Ці модифікації технології дозволяють адаптувати процес спалювання ТПВ в жужільному розплаві до конкретних потреб і умов виробництва, забезпечуючи ефективну та екологічно безпечну обробку відходів.

В цілому, всі технології спалювання ТПВ у металургійних печах мають свої недоліки. Перш за все, це пов'язано з складністю процесу запуску печі. Часто це вимагає спеціалізованого обладнання та великої уваги до регулювання параметрів. Крім того, важко створити ефективну систему автоматичного регулювання, яка б забезпечувала стабільну температуру без додаткових втрат енергії. Одним з ключових недоліків таких технологій є їх низький тепловий коефіцієнт корисного використання (ККД). Це означає, що частина енергії, що витрачається на спалювання ТПВ, не використовується ефективно, а викидається у вигляді тепла в атмосферу. Це зумовлює збільшення енерговитрат і, відповідно, зниження економічної ефективності процесу. Знешкодження відходів у металургійних печах може бути доцільним лише у випадку, коли це необхідно для переробки небезпечних відходів. У такому разі важливо бути обережним у виборі технології та забезпечити ефективне керування процесом, щоб максимально зменшити негативний вплив на довкілля та забезпечити безпеку виробництва.

1.4 Метод представлення апроксимаційної моделі об'єкта як множини лінійних диференційних моделей

1.4.1 Актуальність формалізації розробки апроксимаційних моделей об'єктів управління

На етапі теоретичних досліджень або проектних робіт у розробці систем автоматичного керування можуть бути побудовані моделі різного типу. Під час дослідження вже існуючих об'єктів і протікаючих процесів коло допустимих моделей обмежене. Тип і параметри прийнятої моделі підлягають визначенню. У багатьох джерелах такий процес називається ідентифікацією моделі. Ідентифікація передбачає тотожність ідентифікованих сутностей. Але модель не відображає всієї повноти властивостей описуваного об'єкта. У цьому випадку мова йде про ідентифікацію параметрів моделі з уже вибраною структурою - параметричну ідентифікацію. Математичний апарат такої процедури в теорії автоматичного керування обширний і у багатьох випадках добре розроблений.

Процедура "вибору" структури моделі об'єкта управління менш формалізована. Термін "вибір" використаний не випадково. Саме так у багатьох випадках відбувається визначення структури моделі для подальших досліджень. У такій ситуації прийняте рішення має евристичний характер, а його якість залежить від інтуїції дослідника. Інтуїцію можна уявити як продукт неформалізованих на даний момент знань (досвіду). Через це різні дослідники при вирішенні однакових завдань можуть отримати різні результати. Це допускає неоптимальність або навіть можливість надмірності отриманих результатів вивченим об'єктам і процесам. У багатьох джерелах вибір виду моделі визначається як структурна ідентифікація. Але через відзначене неповне збіг властивостей моделі та об'єкта термін апроксимація ближчий за змістом до виконуваної процедури. Отримання різними дослідниками еквівалентних результатів при вирішенні однакових завдань апроксимації моделей може бути забезпечено формалізацією цієї процедури. Таким чином, актуальним є розробка нових формалізованих методів отримання апроксимаційних моделей вивчених об'єктів управління та процесів, що в них протікають.

1.4.2 Методи побудови моделей об'єктів

У галузях досліджень, пов'язаних з технічними пристроями, детально обговорюються питання моделювання об'єктів [50–51]. Це зумовлено, зокрема, розробкою систем управління, що протікають у них процесами. Використані моделі побудовані на основі суб'єктивних думок, досвіду ряду дослідників. Подальша обґрунтованість прийнятих побудов перевіряється шляхом порівняння з експериментальними даними. У цьому випадку, як і в багатьох інших, показується не суперечливість результатів моделювання процесу в заданих умовах, але не об'єкта. Практично розв'язується пряма задача. У той час як модель може бути побудована при вирішенні зворотної задачі: побудова її можливої структури, що відповідає наявним експериментальним даним. З розвитком апарату моделювання розширюється і сфера його застосування в галузях, не пов'язаних з технікою [52]. Хоча в цій роботі обговорюється структура моделі, але з позицій вибору з декількох, питання її побудови не розглядається. Окрім розширення сфери застосування обговорюються питання автоматизації самого процесу моделювання, автоматизації процесу пошуку апроксимуючих моделей об'єктів і процесів [53]. Але й у цьому випадку розглядається хоч і автоматизований, але вибір структури моделі зі списку наявних.

Широко поширеним методом апроксимації, як технології заміни моделі на більш просту, є лінійаризація. Існує велика кількість її видів. До них відносяться як найпростіші у вигляді розкладу в ряд, так і більш складні. До останніх можна віднести, наприклад, гармонічну лінійаризацію [54], лінійаризацію зворотним зв'язком [55] і цілий ряд інших видів. Загальним недоліком такого підходу є необхідність наявності початкової моделі. А метою структурної апроксимації є пошук такої моделі.

Ще одним підходом до вирішення завдань ідентифікації є зниження розмірності простору моделювання за рахунок безрозмірного зроблення математичних моделей. У питаннях теорії управління та ідентифікації методи безрозмірного зроблення застосовуються відносно недавно. На даний момент існують як окремі статті [56], так і монографії [57]. У цих роботах результати зниження розмірності простору

моделювання визначаються π -теоремою. У [58] запропонований підхід, який дозволяє порівняно з попередніми роботами в більшій мірі зменшити кількість параметрів моделі в результаті процедури безрозмірного зроблення. Відмінною рисою методів безрозмірного зроблення є необхідність формалізованої моделі або, принаймні, її структури. Методи безрозмірного зроблення ефективні при ідентифікації параметрів моделі та не дозволяють визначити її структуру.

Один із способів ідентифікації полягає в налаштуванні регуляторів на основі параметрів протікаючих процесів для забезпечення необхідних характеристик. Так, у [59] використовується модель об'єкта, подібного до розглянутого, і параметри реального протікаючого процесу. На основі цих даних налаштовується регулятор для забезпечення оптимізованих характеристик процесу. У цьому випадку використання моделі об'єкта, подібного до розглянутого, дозволяє говорити про визначення параметрів, а не структури об'єкта. Можливість вибору критерію оптимізації характеристик свідчить про процедуру апроксимації, а не ідентифікації параметрів обраної моделі. У [60] автори пропонують безмодельну платформу адаптивного управління для невідомого об'єкта, використовуючи концепцію еквівалентного контролера динамічної лінеаризації. Запропоновано здійснювати управління без явної ідентифікації процесу. Така конструкція може бути використана для управління конкретним (унікальним) процесом, але не надає підстав для аналізу структури об'єкта. У [61] при налаштуванні регулятора використовуються певні частотні характеристики управляючого процесу. Але так само, як і в [60], не будується структура об'єкта.

У деяких роботах заявляється про пошук найкращої структури моделі. Пошук обмежується не побудовою, а вибором структури з певного визначеного простору. Так, у [62] пропонується за допомогою детермінованого та ймовірнісного підходів визначати найважливіші параметри обчислювальної моделі. Для цього моделюються різні вхідні параметри. У цій роботі відбувається ідентифікація параметрів та вибір моделі, а не побудова її структури. У [63] структура моделі припускається відомою та визначається розглянутим технологічним процесом. Як і у вищезгаданих випадках, відбувається ідентифікація параметрів моделі. Виникаючи при цьому

проблеми обумовлені запізненням сигналу про вимірювану товщину сталевий стрічки та моментом технологічного впливу. У розглянутому випадку відбувається навіть не ідентифікація параметрів моделі, а розробка методу нівелювання транспортного запізнення на технологічний процес.

Відзначені роботи продемонстрували можливість організації системи управління при відсутності моделі об'єкта або процесу. У цьому випадку налаштування параметрів контролерів відбувається на основі поточних параметрів керованих процесів. Фактично, це управління апостеріорі, що стосується лише відбуваючого в даний момент процесу. Такий підхід не дозволяє прогнозувати поведінку об'єкта під час його експлуатації при зміні зовнішніх умов або навіть контрольованої зміни структури об'єкта. Можна вважати, що об'єктивна параметрична ідентифікація для прийнятої моделі об'єкта або процесу. З цих позицій цікаво розглянути можливість формалізованої побудови структури моделі на основі будь-яких вихідних даних, наприклад, експериментальних у вигляді реакції на зовнішній вплив.

1.5 Підвищення ефективності управління процесами термодеструкції органічної сировини за допомогою методів та засобів автоматизованих систем

В роботі [64] розглядається використання математичних моделей другого порядку з запізненням для підвищення ефективності системи. Нова конфігурація системи регулювання дозволяє змінювати лише витрату сертифікованого газу, залишаючи незмінними випадкові зміни витрат доменного та коксового газів. Автори досліджують статистичні характеристики витрати газу на основі експериментальних даних і аналізують результати розрахунку оптимального налаштування контуру регулювання. Для компенсації випадкових збурень витрат газу утилізації, вони пропонують структуру компенсатора, яка складається з двох частин, одна з яких може бути диференційованою, з умовою інваріантності при подачі компенсуючого сигналу на вхід об'єкту. Представлені результати моделювання випадкових збурень витрат газу утилізації.

В роботі [65] аналізується управління утилізаційними установками для спалювання органічної сировини. Автори пропонують створення системи керування, яка враховує нелінійні зв'язки між навантаженням та економічністю установки. Для оптимальної експлуатації установки розроблено універсальну структурну схему, яка може бути реалізована на сучасних контролерах, з метою мінімізації витрат енергії при встановленому тепловому навантаженні.

З метою підвищення енергоефективності установок, які використовують вторинні енергоресурси, розглядалися різні підходи. Один із них — кореляційно-екстремальна система автоматичного керування. Ця система спрямована на максимізацію ефективності під час спалювання утилізованої сировини [66].

В роботі [67] досліджено також каскадну систему підтримки рівня наповнення матеріалу у піролізних установках. Вона відрізняється гнучкістю структури управління, залежно від зміни кількості перероблюваної сировини та витрати енергетичних ресурсів.

В роботі [68] досліджено використання синтез-газу в утилізаційному котлі, отриманого в результаті піролізу. Проведено аналіз різних типів утилізаційних установок та процес модернізації установок для використання вторинних енергетичних продуктів. Розроблена структурна схема системи управління та встановлені вимоги до неї. Показано залежність між подачею повітря та синтез-газу для стабільної роботи, а також вплив цієї залежності на надійність роботи установки.

В роботі [70] розглядається функціональна структура системи автоматичного регулювання повітряним трактом водогрійного котла, представляючи результати дослідження стійкості та якості її роботи. Також розглядається система автоматичного розрядження в топці, визначається її структура і оптимальні значення параметрів налаштувань регуляторів.

В роботі [71] описується система автоматичного регулювання основних параметрів парового котла теплової електростанції з використанням багатовимірною чіткого логічного регулятора. Ця система дозволяє підвищити ефективність процесу горіння шляхом компенсації взаємовпливу контурів регулювання за допомогою

додаткової системи правил нечіткої логіки, яка зв'язує контур регулювання з іншими контурами.

Модель, запропонована в статті [72], відноситься до систем автоматичного регулювання утилізаційними установками і може застосовуватися для автоматичного керування енерготехнологічними установками, зокрема для регулювання рівня сировини при його спалюванні. Ця модель розширює функціональні можливості систем автоматичного регулювання в разі істотної зміни параметрів об'єкта і наявності збурень, при цьому маючи відносно просту реалізацію контуру керування.

Результати розробки, дослідження та впровадження вдосконалених систем автоматичного управління процесами спалювання синтетичного та несертифікованого палива, які опубліковані в джерелі [73], вказують на успішність таких систем у котельних установках. Ці системи призначені для роботи на різних типах палива, отриманих з переробки сировини, і дозволяють досягти максимальної ефективності утилізації теплової енергії і зниження негативного впливу викидів у навколишнє середовище. Вони забезпечують автоматичний контроль технологічних параметрів, захист від аварійних ситуацій і регулювання подачі палива, повітря та розрідження в топці.

У дослідженні, представленому у джерелі [74], розглядається задача синтезу САУ для утилізаційної установки. Використано спрощену модель теплопередачі, де пропонується застосовувати каскадне керування з урахуванням можливості вимірювання проміжної змінної. Внутрішній контур моделі включає типовий П-регулятор, тоді як параметри зовнішнього контуру теплопередачі є нестаціонарними та залежать від навантаження на утилізаційну установку. У такому випадку пропонується використовувати ПІД-регулятор для зовнішнього контуру. Такі дослідження і розробки важливі для енергетичної галузі, оскільки сприяють підвищенню ефективності використання палива та зниженню негативного впливу на довкілля.

В роботі [75] запропоновано оптимальні режими керування горінням у енергетичному устаткуванні, що базується на використанні екстремального регулятора. Цей регулятор забезпечує пошук найкращих параметрів регулювання

для витрати повітря з метою мінімізації споживання синтетичного палива при генерації заданої кількості тепла. Результати випробувань моделі енергетичної установки з такою системою регулювання свідчать про практичну можливість оптимізації режимів горіння та можливість відмови від застосування штатних аналізаторів газів.

В роботі [76] розглянуто метод оптимізації горіння в печі піролізу за допомогою коефіцієнта корисної дії, що спрямований на зниження інерційності процесу регулювання та стабілізацію економічності горіння. Запропоновано метод пошуку оптимального значення цього коефіцієнта.

В роботі [77] розглянуто задачу оптимізації режимів енергетичних котлів з використанням суміші газів, отриманих при переробці твердих палив з нестабільною теплотвірною здатністю. Запропоновано метод динамічного факторного аналізу процесів горіння, який дозволяє оцінювати поточну теплотвірну здатність. Для цього використовуються автоматичні регулятори для подачі палива, повітря, розрідження в топці і режимні параметри. Також запропоновано систему екстремального регулятора для оптимізації подачі повітря і розрідження в топці за критерієм максимуму ККД котла. Ці структури автоматичного регулювання можуть бути використані у широкому спектрі енергетичних процесів, де використовується утворення синтетичного палива.

В роботі [78] обговорюється система оптимального регулювання економічності споживання палива для енергетичного устаткування. Ця система спрямована на мінімізацію споживання палива шляхом стабілізації режимних параметрів та корекції подачі повітря з орієнтацією на максимізацію динамічної ефективності.

В роботі [79] зазначається, що технічні системи часто містять нелінійності та невизначеності, що ускладнює застосування класичних методів автоматичного керування. Тому для розв'язання таких задач використовують системи адаптивного керування з самоорганізацією або саморегуляцією. Далі в роботі розглядається технологічна схема енергетичної утилізаційної установки та її керовані параметри. Вона аналізується за допомогою методу статистичного імітаційного моделювання, для якого наводиться структура імітаційної моделі з компонентами, такими як

модель об'єкта керування, генератор випадкових збурень, модуль прийняття рішень та процедура збору статистики.

В роботі [80] проводиться аналіз енергетичних втрат установки та вивчаються основні параметри, що впливають на її економічність. Розробляється модель для мінімізації цих втрат з можливістю інтеграції її в автоматизовану систему управління технологічним процесом.

В роботі [81] пропонується складна математична модель динаміки енергетичної установки з використанням автоматичної системи управління. Ця модель доповнена основними схемами управління, включаючи завадостійкі алгоритми, і вивчається взаємодія між ними. Результати моделювання найважливіших технологічних параметрів представлені у вигляді перехідних процесів.

В роботах [82–83] розглядається актуальне питання оптимізації роботи теплоелектростанцій з метою отримання найвищої економічної ефективності при найвищій генерації тепла. Автори дослідили спосіб тривалого безперервного автоматичного визначення залишкового ресурсу елементів котла, який діє під тиском, як складова частина загальної системи діагностики. Також розглянуто особливості оптимізації параметрів системи управління паровим котлом методом повного перебору з використанням системи комп'ютерної математики [84].

В роботі [85] розглядається математична модель парового котлоагрегату з турбінним наддувом, який використовується як корабельна силова установка. Ця модель включає систему рівнянь динаміки турбокомпресора, матеріального і теплового балансу газоповітряного тракту котла. Вона призначена для налаштування системи керування котла з регуляторами подачі палива, витрати повітря і пари.

В роботі [86] досліджено необхідний запас стійкості систем регулювання інерційних об'єктів в умовах зміни режиму роботи технологічного обладнання. Автори запропонували структурні рішення та методики налаштування, і провели імітаційне моделювання перехідних процесів, а також розрахунки і порівняння показників якості регулювання.

В роботі [87] було проведено наліз систем автоматичного керування котельними, при цьому результати порівняння характеристик шаф автоматики для

керування паровими котлами типу ДЕ відповідають сучасним вимогам безпеки та ефективності. Показано, що використання систем диспетчеризації для територіально розподілених об'єктів є необхідним та ефективним.

В роботі [88] проведено аналіз якості функціонування цифрових регуляторів двох типів. Перший тип побудований на базі функціональних блоків і реалізує пропорційно-диференційний закон регулювання, другий використовує пропорційно-інтегрально-диференціальний закон в цифровій формі. Параметром регулювання є рівень в барабані парового котла, а виконавчий механізм - клапан, керований реверсивним електродвигуном.

В роботі [89] запропоновано програмну реалізацію нечіткого регулятора для системи керування утилізаційною установкою з метою адаптації ПІД-регулятора на основі чітких терм-множин. Для практичного впровадження запропоновано алгоритм фазифікації безперервних технологічних величин установки і структурної схеми керування, як надбудови над класичними ПІД-регуляторами зі змінними коефіцієнтами. На основі системи правил двозначної логіки розроблено структурну схему регулювання процесом горіння і пароутворення.

В роботі [90] за рахунок зменшення похибки при апроксимації експериментальних перехідних характеристик випереджаючої і інерційної ділянки об'єкта регулювання при переході до розімкнуто-замкнутої системи регулювання продемонстровано підвищення якості регулювання температури перегрітої пари, якої можна досягти при визначенні параметрів динамічного налаштування АСР.

В автоматизованій системі з ПІ і ПІД-регулятором [91] проведено дослідження впливу відносної сталої часу об'єкта, що змінюється в широких границях, на якість регулювання температури перегрітої пари на виході котла з урахуванням величини регулюючого впливу. В основу дослідження покладено АСР з одним контуром. Зроблено такий висновок: чим менша величина відносної сталої часу об'єкта, тим більша інтегральна помилка регулювання при відпрацюванні зовнішнього збурення АСР з ПІД-регулятором. Крім того, зменшення значення відносної постійної часу об'єкта при відпрацюванні зовнішнього збурення призводить до зменшення

відносного часу появи максимальної динамічної помилки регулювання від загального відносного часу регулювання.

Розглянуто каскадну систему [92] з ПІ-регулятором у зовнішньому контурі з введенням функціональної складової сигналу неузгодженості зовнішнього контуру і від'ємним зворотним зв'язком по сигналу неузгодженості між завданням по витраті пари і сигналом витрати пари на виході котла у внутрішньому контурі.

Робота [93] присвячена вирішенню проблем побудови ефективних систем керування для різних технічних систем у умовах невизначеності. У тексті розглядаються питання аналізу, проектування, дослідження і практичного використання систем керування з урахуванням критерію надлишкової стійкості.

В роботі [94] описано загальний принцип енергозберігаючого керування для парових котлів теплових електростанцій. У моделях керування котельною установкою враховані параметри активатора горіння, що покращують процес згоряння низькосортних палив. Також описано спосіб підвищення точності вимірювання та регулювання подачі твердого палива в топку котла. Розроблено систему автоматичного регулювання подачі активаторів горіння на основі визначення якості та кількості подаваного палива.

В роботі [95] зазначено, що паровий котел є складною системою, кожен контур якої має хоча б одну спільну ланку регулювання з іншим контуром. Пропонується система керування параметрами, синтезована на основі принципів автономності та інваріантності. Також описано метод синтезу коригування зв'язку регуляторів для системи з двічі зв'язаними контурами, що може бути використаний при дослідженні систем на стійкість, керованість, спостережливість і якість перехідних процесів.

В роботі [96] детально описано результати роботи з автоматизації керування процесом горіння палива в котельній установці, а також пропонуються шляхи підвищення ефективності цього процесу на основі екстремального керування.

В останній частині роботи [97] наведено результати досліджень у сфері математичного моделювання теплових процесів котельного агрегату. Представлена математична модель керування температурою перегрітої пари котельного агрегату,

яка адекватно реагує на збурення і відновлює задану температуру перегрітої пари, змінюючи при цьому необхідні параметри системи.

У роботі [98] проведені дослідження спрямовані на розробку системи керування, яка б забезпечувала підвищену точність регулювання витрати газу та температурних показників перегрітої пари у котельних установках. Головною метою є розробка системи автоматичного регулювання витрати газу в топці котельного агрегату для підвищення ефективності його роботи.

У роботі [99] розглядаються технологічні схеми парових котлів, описуються їхні процеси функціонування та ставляться завдання керування цими процесами. Також надається рішення щодо багатовимірного регулювання теплового навантаження котла, де автоматичні регулятори використовуються з урахуванням особливостей котла як об'єкта автоматизації.

У роботі [100] представлено рішення щодо розробки системи керування котлом теплової станції з використанням сучасних технічних та програмних засобів. Також пропонується метод попереджувального керування складними технологічними комплексами на основі моделей зворотної динаміки та методу експоненціальної фільтрації.

У роботі [101] розглядаються завдання керування технологічними процесами в парових котлах, пропонуються теоретичні моделі для моделювання цих процесів та модель керування водно-хімічним режимом.

Дослідження показали, що типовим підходом є використання газоаналітичних приладів для вимірювання параметрів та використання адаптивних систем керування для підвищення ефективності систем. Однак ускладнення виникає через агресивні компоненти у вторинних енергетичних ресурсах, що можуть призводити до швидкого зносу приладів.

1.6 Постановка завдань дослідження

Однією з екологічних проблем є завдання утилізації побутових, сільськогосподарських та інших видів органічних відходів. Зростаючий обсяг

відходів призвів до кризи можливості їх зберігання на різних полігонах. У Європі, як у регіоні, який найгостріше відчуває проблему виділення місць для зберігання відходів, розроблена дорожня карта обробки відходів. Згідно з нею до 2035 року країнам Європейського союзу буде дозволено розміщувати на полігонах не більше 10% комунальних відходів. Для досягнення цих показників широко впроваджується сортування відходів з подальшим їх ресайклінгом та компостуванням. Незважаючи на це, близько 50% відходів у теперішній час (і у майбутньому) припадає або просто згоряти, або згоряти з одержанням енергії. У країнах Європейського союзу згоряє близько 100 млн. тонн сміття на рік. До 2035 року планується збільшити цю цифру до приблизно 140 млн. тонн. Термічне утилізування відходів відноситься до "грязних" методів їх переробки, але на даний момент не має альтернативи. Однією з основних причин забруднення викидів сміттєспалювальних заводів є змінний і невідомий склад сировини (сміття), що підлягає спалюванню. В результаті цього не вдається організувати керований процес подачі повітря для оптимізації процесу горіння.

Отримання енергії при спалюванні таких значних обсягів органічних відходів привабливе само по собі. Але актуальність цього процесу може зрости, якщо його розглядати разом з альтернативними джерелами енергії (сонячні та вітроагрегати) з точки зору спільного управління процесами з виключенням або зменшення використання копалинних видів органічних палив. Реалізація такого процесу ускладнена, так само як і в разі забруднення викидів сміттєспалювальних заводів, змінністю складу сировини та недостатньою керованістю процесу його горіння. У зв'язку з цим є актуальною розробка способу керованої термічної переробки органічних речовин змінного невідомого складу.

Одним із способів вирішення проблеми, пов'язаної зі змінністю складу перероблюваних органічних речовин, є сортування відходів з метою гомогенізації складу фракцій. Однак навіть у країнах, де система збору та переробки сміття розвинена найкращим чином, таких як Швеція, існує проблема ефективного сортування відходів. Склад сортованого сміття може суттєво змінюватися залежно від регіону, де воно було зібране, або часу року, в якому проводилося сортування.

Відсутність налагодженої системи сортування органічних відходів у більшості місць є серйозним стримуючим фактором для їх ефективної переробки. Складна ситуація з переробкою сортованих відходів навіть у розвинених країнах підтверджується незалежним дослідженням, проведеним The Guardian. У ньому, посилаючись на федеральний звіт у США, вказано, що кількість сортованого пластика, який відправляється на вторинну переробку, становить лише 5%. Решта сортованого пластика відправляється на полігони сміттєзвалищ. Така ситуація виникла після того, як Китай з 2017 року відмовився від імпорту відходів для переробки з США через погане сортування. За прогнозами The Washington Post, за таких умов до 2030 року США зіткнуться з дефіцитом потужностей для переробки 37 млн тонн сміття. Ці дані свідчать, що навіть у попередні роки більшість сортованих відходів не перероблялися всередині країни, а вивозилися для переробки в інші країни. Схожа ситуація спостерігається й у європейських країнах. Наприклад, Німеччина, яка справедливо займає провідне місце в Європі за рівнем сортування та переробки відходів, також стикається з проблемами в цій сфері. Офіційна вимога щодо переробки пластикових відходів у Німеччині становить 36%, але ця цифра включає пластик, який був відсортований і вивезений до Китаю. За оцінкою BDE (Федеральне об'єднання німецьких підприємств зі збору та переробки відходів, водних і сировинних галузей), обсяг вивезених до Китаю пластикових відходів з 2017 по 2018 рік зменшився на 95%: з 340 тисяч тонн до 16 тисяч тонн. Європейський союз поставив перед собою мету до 2035 року зменшити обсяг відходів, що захоронюються на полігонах, до не більше ніж 10% від загального обсягу. Решта відходів має перероблятися або спалюватися. Однак, за даними Spiegel, на даний момент лише 16% пластикових відходів піддаються вторинній переробці, що свідчить про значні труднощі у досягненні поставлених цілей.

Утилізація біорозкладних компонентів, які входять до складу побутових відходів, є важливою задачею з точки зору охорони навколишнього середовища. Одним із способів їх переробки є компостування. Проте основною проблемою є сортування — розділення на розкладаючі та нерозкладаючі складові.

Переробка нерозкладаючої або погано біорозкладаючої частини органічних відходів на сміттєспалювальних заводах вважається одним із найшкідливіших методів їхньої утилізації, поступаючись лише прямому захороненню на полігонах твердих побутових відходів. Однак, як заміна спалюванню, перспективним є двостадійний процес, що ґрунтується на піролізі, з подальшою можливістю використання отриманих хімічно активних (горючих) речовин у контрольованих процесах. Крім того, цей процес є енергоефективнішим у порівнянні з анаеробним бродінням, адже для підтримання параметрів піролізу потрібно всього 10% від утворених горючих речовин.

Процес повільного піролізу використовується протягом тривалого часу та є добре вивченим з технологічної точки зору. Однак значна частина реакційних продуктів перебуває у газовій фазі, що потребує їхнього негайного використання після утворення. У більшості випадків обладнання для повільного піролізу працює циклічно, зі зміною складу реакційного середовища протягом циклу, що призводить до зміни складу реакційних продуктів. Ще одним важливим фактором, що впливає на кількісне співвідношення речовин у сумі реакційних продуктів, є вологість початкових матеріалів. Для організації керованого процесу використання продуктів повільного піролізу необхідний фіксований та відомий склад вихідної сировини. Повільний піроліз може бути корисним для переробки органічних відходів з метою отримання вторинних енергоресурсів. Виділяють низькотемпературний та високотемпературний повільний піроліз. Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що зі збільшенням температури процесу підвищується вихід горючої газоподібної фази. При високих температурах, близько 1500 °C, та наявності достатньої кількості парів води, маса вугільного залишку та конденсованої фази може бути зведена до мінімуму. Це є позитивним фактором за умови, що буде вирішена проблема негайного використання газоподібного палива з невідомим і змінним складом. Однак висока вологість вихідної сировини або цілеспрямоване введення води в зону реакції вимагає збільшення витрати енергії для підтримання необхідної температури процесу. Це ускладнює процес і може вплинути на його енергоефективність. Тим не менш, повільний піроліз залишається важливим

методом переробки органічних відходів завдяки своїм потенціальним можливостям у виробництві вторинних енергоресурсів.

У багатьох випадках піроліз розглядається як процес термічного розкладу органічних речовин без доступу повітря. Це означає, що органічні матеріали розкладаються під дією високих температур в умовах, коли кисень або інші окиснювачі відсутні або їх кількість є мінімальною. Для зовнішнього обігріву реакційної зони використовуються різні види палива, такі як природний газ, мазут або інші джерела тепла. Однак, більш коректно піроліз слід розглядати як процес розкладу при нестачі повітря, що робить його частковим випадком процесу газифікації органічних речовин. В ще ширшому контексті, піроліз можна сприймати як спалювання при нестачі повітря. Такий підхід дає можливість переходу від зовнішнього обігріву до внутрішнього. Це досягається за рахунок використання енергії, що виділяється під час самого процесу піролізу, газифікації або згоряння при умовах малого коефіцієнта надлишку окисника. Внаслідок цього виникає можливість не тільки економії палива, але й забезпечення рівномірного прогріву реакційної зони без використання теплообмінних поверхонь. Це також дозволяє організувати неперервний і регульований процес при умовах контрольованої подачі компонентів. Використання внутрішнього обігріву має потенціал для значного підвищення ефективності процесу, оскільки тепло, що виділяється під час піролізу, може бути безпосередньо використане для підтримки необхідної температури в реакційній зоні. Це не тільки скорочує витрати на паливо, але й дозволяє уникнути проблем, пов'язаних з корозією і зносом теплообмінних поверхонь. Крім того, за допомогою контрольованої подачі компонентів можна забезпечити стабільність і регульованість процесу, що є важливим для промислових застосувань. Таким чином, розгляд піролізу в контексті внутрішнього обігріву і часткового окиснення відкриває нові можливості для підвищення ефективності і стабільності цього технологічного процесу.

Організація такого способу піролізу стримується через невизначеність та змінність складу вихідної сировини, а також через її високу вологість, що часто спостерігається. При підвищеному вмісті вологи процес газифікації може бути

організований на основі методу, який здобув розвиток останнім часом. Цей метод базується на реалізації процесу, який відповідає фільтраційному горінню в сверхадіабатичному режимі. Такий процес дозволяє спалювати органічні речовини з низькою калорійністю або організовувати його таким чином, щоб до 95% теплової енергії згоряння було перетворено на калорійність утворених продуктів у газовій фазі. Це означає, що можуть бути перероблені матеріали з низьким вмістом вуглецю (від 10%) і вологістю до 60%. При заданому складі перероблюваної речовини, її газифікація у сверхадіабатичному режимі дозволяє зменшити витрати паливної складової при одночасному збільшенні температури в реакційній зоні. Це призводить до збільшення виходу горючих газів при одночасному зменшенні твердого (вуглистого) залишку. Особливістю процесу горіння у сверхадіабатичному режимі є зустрічний рух вихідної сировини (пального) та фронту горіння разом із його продуктами. Продукти горіння забезпечують сушіння сировини та початкове її розкладання до надходження в зону екзотермічних реакцій. Це означає, що у зону реакції не надходить видалена волога та продукти низькотемпературного розкладання, що зменшує вихід горючих газів. До недоліків цього методу також слід віднести неможливість управління витратами продуктів реакції при заданому температурному режимі процесу. Витрата залежить від розміру реактора та складу вихідної сировини. Процес газифікації в умовах сверхадіабатичного режиму має кілька важливих переваг, які роблять його перспективним для використання в різних галузях. Зокрема, можливість обробки матеріалів з низьким вмістом вуглецю та високою вологістю є ключовою перевагою. Це відкриває нові можливості для використання різноманітних відходів як сировини для газифікації. Також важливим є те, що високий рівень перетворення теплової енергії в калорійність продуктів згоряння дозволяє зменшити витрати на паливо та підвищити ефективність процесу. З іншого боку, необхідність контролювати процес і враховувати специфічні властивості сировини вимагає детальних досліджень та розробок для оптимізації цього методу. Нemoжливість управління витратами продуктів реакції при заданому температурному режимі процесу є одним із аспектів, що потребує вирішення. В цілому, розвиток технологій газифікації в сверхадіабатичному режимі може суттєво

змінити підходи до переробки відходів та виробництва енергії, підвищуючи їх ефективність та екологічну безпеку.

Із наведеного матеріалу можна зробити перший висновок: не існує моделі визначення складу продуктів термодеструкції при відомому складу вихідної органічної сировини. Модель може складатися з рівнянь закону діючих мас, закону збереження речовини. Можливо замінити концентрацій продуктів розкладання якимось іншими фізико-хімічними характеристиками. Така заміна може дати можливість одночасного врахування газової та конденсованої фаз. Для розв'язання такого наукового завдання необхідно розробити методи та моделі ідентифікації складу сировини за рахунок визначення рівноважного складу продуктів термічної деструкції.

Було отримано другий висновок: не існує моделі ідентифікації бруто-формули та ентальпії продуктів термодеструкції за рахунок вимірювання технологічних параметрів процесу їх допалювання у спеціальному пристрої. Використання такого пристрою дає можливість визначення бруто-формули та ентальпії вихідної органічної сировини. Для розв'язання такого наукового завдання необхідно розробити моделі об'єкта керування автоматизованої системи для установки термічної деструкції при переробці органічних відходів довільного складу.

Було отримано третій висновок: не відомий метод синтезу моделі об'єкта керування у вигляді системи диференціальних рівнянь, за рахунок використання метода апроксимації Паде по експериментальним даним. Такий метод може дати змогу отримати передавальну функцію об'єкта керування. Для розв'язання такого наукового завдання необхідно розробити модель автоматизованої системи установки термічної деструкції для переробки органічних відходів довільного складу.

1.7 Висновки до розділу

Розглянуто можливі джерела походження органічних відходів. Виокремлено дві їхні групи: відходи біомаси та тверді побутові відходи.

Проведено оцінку енергетичного потенціалу рослинної біомаси в Україні. Розглянуто можливі технологічні схеми процесу термодеструкції біомаси та способи управління ними.

Визначено структуру твердих побутових відходів. Виявлено залежність співвідношення компонентів, що входять до відходів, від пори року та джерела походження. Розглянуто можливі технологічні схеми переробки твердих побутових відходів.

Зазначено складність розроблення моделі процесу термодеструкції для різних видів сировини. Як один зі шляхів розв'язання цієї проблеми виділено апроксимаційний спосіб побудови моделі. Наголошено на необхідності формалізації такого процесу.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ СКЛАДУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТІВ ТЕРМОДЕСТРУКЦІЇ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

Розділ присвячений розробці моделі об'єкта управління термодеструкцією твердих органічних речовин для виробництва продукту-газу з максимальною теплотворною здатністю. Розроблено імітаційну модель процесу піролізу за методом газифікації у сверхадіабатичному режимі, який, залежно від складу вихідної сировини, дозволяє одержати продукт-газ з максимальною теплотворною здатністю при мінімальній кількості вугільного залишку.

2.1 Математична модель визначення складу продуктів термодеструкції (піролізу)

Модель будується з урахуванням рівноважного процесу термодеструкції органічних речовин [11], [16]. Використовуючи обмежену кількість основних хімічних елементів, які можуть входити до складу вихідної речовини (наприклад, С, Н, О, N), можна визначити перелік основних речовин, що входять до складу продуктів реакції. Цей перелік ідентифікується на основі попередніх розрахунків, відомих експериментальних даних і може включати, наприклад:

$$H_2O, CO_2, CO, CH_4, H_2, O_2, N_2, C_U, C, H, O, N. \quad (2.1)$$

Тут C_U — вугільний залишок.

Нададіабатичний режим термодеструкції забезпечує умови отримання рівноважного складу кінцевих продуктів. Температура у рівноважній зоні реакцій визначається з урахуванням закону збереження енергії. Він виявляється у рівності ентальпій у вихідних продуктах і продуктах реакції. Використовуючи прийняті

припущення, узагальнена модель процесів побудована на основі методу, запропонованого у [105]. У його рамках розглянемо види рівнянь, що входять до моделі, та їх особливості.

Закон чинних мас. Для кожної речовини (2.1), що входять до складу продуктів реакції, записується рівняння термохімічної рівноваги. Як продукти реакції можуть бути обрані речовини, утворення яких найбільш ймовірно в процесі оборотних реакцій. Але зручніше подібні реакції будувати із застосуванням елементарних хімічних речовин. Наприклад, для CO_2 така реакція може мати вигляд:



У цьому випадку закон чинних мас може бути записаний для відповідних концентрацій у вигляді:

$$K_{\text{CO}_2}(T) = \frac{C_{\text{C}} \cdot C_{\text{O}}^2}{C_{\text{CO}_2}}. \quad (2.3)$$

При газоподібному стані продуктів реакції такого роду реакції зручніше записувати через парціальний тиск. У довідковій літературі значення констант хімічної рівноваги K^P наводяться для запису рівнянь закону мас по парціальним тискам. У цьому випадку кількість молей вихідної речовини M_T вибирають (визначається в процесі розрахунку) таким чином, щоб парціальні тиски газоподібних продуктів дорівнювали їх концентраціям. У цьому випадку рівняння (2.3) запишеться у вигляді:

$$K_{\text{CO}_2}^P(T) = \frac{P_{\text{C}} \cdot P_{\text{O}}^2}{P_{\text{CO}_2}}. \quad (2.4)$$

У цьому випадку вихідна речовина, що піддається піролізу, і один з можливих продуктів розкладання (вугільний залишок) знаходяться в конденсованому стані. Склад продуктів розкладання зручніше виражати у мольних частках. Особливістю запропонованої моделі є використання величин тисків, які вимірюються не в Паскалях (Па), а в барах. В цьому випадку в прийнятій схемі величини, що позначаються парціальними тисками, слід розглядати як мольні частини. Як наслідок при записі рівнянь виду (2.4) необхідне використання констант хімічної

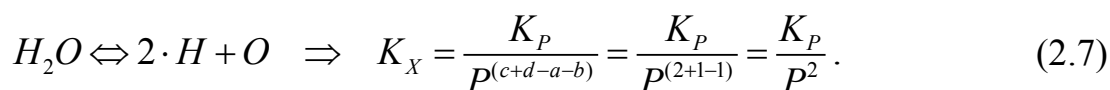
рівноваги за мольними частками K_X , розраховані з використанням констант за парціальними тисками. Для оборотної реакції виду:



константи K_P та K_X пов'язані співвідношенням:

$$K_P = K_X \cdot P^{(c+d-a-b)} \Rightarrow K_X = \frac{K_P}{P^{(c+d-a-b)}}. \quad (2.6)$$

Тут A, B, C, D – хімічні речовини, що беруть участь в реакції; a, b, c, d – мольні коефіцієнти; P – тиск суміші газоподібних продуктів реакції, виражений у Па; K_P – константа хімічної рівноваги за парціальними тисками (довідкова величина). Наприклад для реакції виду:



Різний агрегатний стан газоподібних продуктів піролізу та вуглецевого залишку призводить до особливостей запису решти рівнянь пропонованої моделі порівняно з тією, що використовує парціальні тиски. При запису закону збереження речовини для вуглецю (хімічного елемента) кількість вугільного залишку, що утворюється, враховується в балансі продуктів згоряння порошу як і у вихідному варіанті. Але потрібна корекція замикаючого рівняння. При використанні для розрахунку складу продуктів піролізу їх парціальних тисків та відповідних констант хімічної рівноваги K_P кількість конденсованої фази (вугільного залишку) у переліку компонентів продуктів згоряння не враховується. Це обґрунтовується її малим обсягом у

Таблиця 2.1 – Основні реакції утворення

1	$H_2O \leftrightarrow 2H + O$
2	$CO_2 \leftrightarrow C + 2O$
3	$CO \leftrightarrow C + O$
4	$CH_4 \leftrightarrow C + 4H$
5	$H_2 \leftrightarrow 2H$
6	$O_2 \leftrightarrow 2O$
7	$N_2 \leftrightarrow 2N$
8	$C_U \leftrightarrow C$

порівнянні з газоподібними складовими. У цьому випадку як замикаюче рівняння використовується закон Дальтона. При записі замикаючого рівняння в моделі, що розглядається, враховуються мольні частини всіх можливих компонентів продуктів піролізу, в тому числі і вугільного залишку.

Для переліку речовин (2.1) враховуються реакції утворення, що відображені в таблиці 2.1.

З урахуванням зазначених особливостей система рівнянь при цьому переліку реакцій утворення речовин запишеться як:

закон чинних мас

$$\frac{P_H^2 \cdot P_O}{P_{H_2O}} = K_{X(H_2O)}(T); \quad (2.8)$$

$$\frac{P_C \cdot P_O^2}{P_{CO_2}} = K_{X(CO_2)}(T); \quad (2.9)$$

$$\frac{P_C \cdot P_O}{P_{CO}} = K_{X(CO)}(T); \quad (2.10)$$

$$\frac{P_C \cdot P_H^4}{P_{CH_4}} = K_{X(CH_4)}(T); \quad (2.11)$$

$$\frac{P_H^2}{P_{H_2}} = K_{X(H_2)}(T); \quad (2.12)$$

$$\frac{P_O^2}{P_{O_2}} = K_{X(O_2)}(T); \quad (2.13)$$

$$\frac{P_N^2}{P_{N_2}} = K_{X(N_2)}(T); \quad (2.14)$$

$$\frac{P_C}{P_U} = K_{X(U)}(T). \quad (2.15)$$

Виходячи з умов побудови моделі, немає необхідності враховувати структуру речовини, що розглядається. У цьому випадку умовна формула речовини або суміші речовин (брутто-формула) має вигляд:

$$C_{b_C} H_{b_H} O_{b_O} N_{b_N}. \quad (2.16)$$

Тут b_C , b_H , b_O , b_N – кількість відповідних атомів в умовній формулі речовини або суміші речовин, що піддаються піролізу.

Наступні 4 рівняння запишемо, виражаючи закон збереження речовини у вигляді рівності кількості атомів відповідного хімічного елемента у вихідній речовині та продуктах піролізу. Скористаємося тим, що у цьому випадку парціальні тиску газів у продуктах згоряння чисельно рівні їх мольним часткам. Кількість атомів у вихідній речовині беремо на підставі виразу (2.16) з урахуванням кількості молекул, що розглядаються M_T :

закон збереження речовини

$$\text{для [C]} \quad b_C \cdot M_T = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + P_{C_U} + P_C, \quad (2.17)$$

$$\text{для [H]} \quad b_H \cdot M_T = 2 \cdot P_{H_2} + 2 \cdot P_{H_2O} + 4 \cdot P_{CH_4} + P_H, \quad (2.18)$$

$$\text{для [O]} \quad b_O \cdot M_T = P_{CO} + 2 \cdot P_{CO_2} + P_{H_2O} + 2 \cdot P_{O_2} + P_O, \quad (2.19)$$

$$\text{для [N]} \quad b_N \cdot M_T = 2 \cdot P_{N_2} + P_N. \quad (2.20)$$

При використанні парціальних тисків як замикальне рівняння використовується закон Дальтона у вигляді їх суми лише для газоподібних продуктів. У цьому випадку замість нього використовується рівняння у вигляді суми мольних часток всіх продуктів реакції, у тому числі і конденсованої фази, і прирівнюючи їх, наприклад, 1:

$$1 = P_{H_2O} + P_{CO_2} + P_{CO} + P_{CH_4} + P_{H_2} + P_{O_2} + P_{N_2} + P_{C_U} + P_C + P_H + P_O + P_N. \quad (2.21)$$

2.2 Метод розв'язання модельної задачі

Система алгебраїчних рівнянь (2.8) – (2.15), (2.17) – (2.15) є нелінійною. Для її вирішення можна використовувати метод Ньютона. Застосування на вирішення цього може зіткнутися з певними труднощами. Він передбачає лінеаризацію рівнянь системи та вирішення їх щодо поправок невідомих величин. Однак при вирішенні таких систем можуть виникати труднощі через різницю в масштабах величин, наприклад, дуже малих і дуже великих значень. Різниця може досягати 10-15 порядків. Однією зі стратегій подолання цих труднощів є логарифмування вихідної системи рівнянь. Такий підхід призводить до того, що різниця між членами модифікованої системи знижується і може становити лише у 10-15 разів. Процес логарифмування застосовується до всіх рівнянь моделі. Для рівнянь (2.8) – (2.15) отримаємо:

$$2 \cdot \ln(P_H) + \ln(P_O) - \ln(P_{H_2O}) - \ln[K_X(H_2O)(T)] = 0, \quad (2.22)$$

$$\ln(P_C) + 2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) - \ln[K_X(CO_2)(T)] = 0, \quad (2.23)$$

$$\ln(P_C) + \ln(P_O) - \ln(P_{CO}) - \ln[K_X(CO)(T)] = 0, \quad (2.24)$$

$$\ln(P_C) + 4 \cdot \ln(P_H) - \ln(P_{CH_4}) - \ln[K_X(CH_4)(T)] = 0, \quad (2.25)$$

$$2 \cdot \ln(P_H) - \ln(P_{H_2}) - \ln[K_{X(H_2)}(T)] = 0, \quad (2.26)$$

$$2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{O_2}) - \ln[K_{X(O_2)}(T)] = 0, \quad (2.27)$$

$$2 \cdot \ln(P_N) - \ln(P_{N_2}) - \ln[K_{X(N_2)}(T)] = 0, \quad (2.28)$$

$$\ln(P_C) - \ln(P_U) - \ln[K_{X(U)}(T)] = 0. \quad (2.29)$$

Для рівнянь (2.17) – (2.20) виконаємо також виконаємо процедуру логарифмування:

$$\text{для [C]} \quad \ln(P_{CO} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + P_{C_U} + P_C) - \ln(M_T) - \ln(b_C) = 0, \quad (2.30)$$

$$\text{для [H]} \quad \ln(2 \cdot P_{H_2} + 2 \cdot P_{H_2O} + 4 \cdot P_{CH_4} + P_H) - \ln(M_T) - \ln(b_H) = 0, \quad (2.31)$$

$$\text{для [O]} \quad \ln(P_{CO} + 2 \cdot P_{CO_2} + P_{H_2O} + 2 \cdot P_{O_2} + P_O) - \ln(M_T) - \ln(b_O) = 0, \quad (2.32)$$

$$\text{для [N]} \quad \ln(2 \cdot P_{N_2} + P_N) - \ln(M_T) - \ln(b_N) = 0. \quad (2.33)$$

Врешті-решт виконаємо логарифмування рівняння (2.21):

$$\ln(P_{H_2O} + P_{CO_2} + P_{CO} + P_{CH_4} + P_{H_2} + P_{O_2} + P_{N_2} + P_{C_U} + P_C + P_H + P_O + P_N) - \ln(1) = 0. \quad (2.34)$$

Хоча застосування логарифмування до вихідної системи рівнянь може допомогти знизити різницю між її членами, воно повністю не вирішує проблему великої різниці в масштабах величин, яка може виникнути при лінеаризації. Зазвичай при лінеаризації системи використовуються як аргументи шукані величини (в даному випадку малі частки). Це може призвести до значних відмінностей у поправках для цих величин, що досягає тих же 10-15 порядків. Щоб уникнути цієї проблеми, пропонується використовувати логарифми шуканих аргументів як аргументи під час диференціювання. Такий підхід дозволить більш рівномірно розподілити різницю у масштабах величин. Таким чином, члени рівнянь модифікованої системи набувають вигляду логарифмів деяких функцій, а всі рівняння можуть бути представлені у формі "логарифмічного рівняння"

$\sum_i \{\ln[f(x_i)]\}$. Для виконання лінеаризації такої системи необхідно знайти похідні

від логарифмів аргументів виду, що шукаються:

$$\frac{d \sum_i \{\ln[f(x_i)]\}}{d[\ln(x_i)]} = \frac{\sum_i d\{\ln[f(x_i)]\}}{d[\ln(x_i)]} \quad (2.35)$$

Рівняння (2.22 – 2.34) відрізняються своїм особливим характером. Функції в цих рівняннях мають лінійну залежність. Форма похідної (2.35) у такому контексті набуває специфічного вигляду.

$$\frac{d[\ln(k \cdot x + a)]}{d[\ln(x)]}, \quad (2.36)$$

де k, a - постійні.

Виконаємо заміну: $t = \ln(x) \Rightarrow x = e^t$ (2.36). В результаті:

$$\frac{d[\ln(k \cdot x + a)]}{d[\ln(x)]} = \frac{d[\ln(k \cdot e^t + a)]}{d(t)} = \frac{1}{k \cdot e^t + a} \cdot k \cdot e^t. \quad (2.37)$$

Виконавши зворотну підстановку, маємо:

$$\frac{1}{k \cdot e^t + a} \cdot k \cdot e^t = \frac{k \cdot x}{k \cdot x + a}, \quad (2.38)$$

або:

$$\frac{d[\ln(k \cdot x + a)]}{d[\ln(x)]} = \frac{k \cdot x}{k \cdot x + a}. \quad (2.39)$$

Як приклад лінеаризуємо, наприклад, рівняння (2.22). Після лінеаризації за пропонованим методом отримаємо:

$$\begin{aligned}
& 2 \cdot \Delta[\ln(P_H)] + 1 \cdot \Delta[\ln(P_O)] - 1 \cdot \Delta[\ln(P_{H_2O})] = \\
& = (-1) \cdot \{2 \cdot \ln(P_H) + \ln(P_O) - \ln(P_{H_2O}) - \ln[K_{X(H_2O)}(T)]\}^* ,
\end{aligned} \tag{2.40}$$

У контексті даного викладу верхній індекс * вказує на те, що вираз у фігурних дужках є початковим наближенням або значенням, взятим з попереднього етапу обчислень. Це позначення дозволяє відстежувати походження значень та спрощує процес їхнього аналізу.

Для спрощення запису і зниження громіздкості виразів надалі використовуватимуться такі позначення: вираз виду $\Delta[\ln(P_O)]$ буде представлено як Δ_O , а, наприклад $\Delta[\ln(P_{H_2O})]$, позначатиметься як Δ_{H_2O} . Це дозволить більш компактно і ясно записувати рівняння та вирази, покращуючи читання та розуміння процесу вирішення задачі.

Обробка рівнянь виду (2.30 – 2.33) є більшою складністю в контексті даного підходу. Візьмемо, наприклад, рівняння (2.30). Після застосування логарифмування та лінеаризації до цього рівняння отримаємо:

$$\begin{aligned}
& \frac{P_{CO}}{A} \Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{A} \Delta_{CO_2} + \frac{P_{CH_4}}{A} \Delta_{CH_4} + \frac{P_{C_U}}{A} \Delta_{C_U} + \frac{P_C}{A} \Delta_C - 1 \cdot \Delta_{M_T} = \\
& = (-1) \cdot [\ln(A) - \ln(M_T) - \ln(b_C)]^* ,
\end{aligned} \tag{2.41}$$

$$\text{де } A = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + P_{C_U} + P_C.$$

Застосовуючи описаний метод до вихідної системи рівнянь (2.22 – 2.34), перетворимо її на лінеаризовану систему рівнянь:

$$\begin{aligned}
& 2 \cdot \Delta_H + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{H_2O} = \\
& = (-1) \cdot \{2 \cdot \ln(P_H) + \ln(P_O) - \ln(P_{H_2O}) - \ln[K_{X(H_2O)}(T)]\}^* ,
\end{aligned} \tag{2.41}$$

$$\begin{aligned}
& 1 \cdot \Delta_C + 2 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{CO_2} = \\
& = (-1) \cdot \{\ln(P_C) + 2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) - \ln[K_{X(CO_2)}(T)]\}^* ,
\end{aligned} \tag{2.42}$$

$$\begin{aligned}
& 1 \cdot \Delta_C + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{CO} = \\
& = (-1) \cdot \{\ln(P_C) + \ln(P_O) - \ln(P_{CO}) - \ln[K_{X(CO)}(T)]\}^*,
\end{aligned} \tag{2.43}$$

$$\begin{aligned}
& 1 \cdot \Delta_C + 4 \cdot \Delta_H - 1 \cdot \Delta_{CH_4} = \\
& = (-1) \cdot \{\ln(P_C) + 4 \cdot \ln(P_H) - \ln(P_{CH_4}) - \ln[K_{X(CH_4)}(T)]\}^*,
\end{aligned} \tag{2.44}$$

$$2 \cdot \Delta_H - 1 \cdot \Delta_{H_2} = (-1) \cdot \{2 \cdot \ln(P_H) - \ln(P_{H_2}) - \ln[K_{X(H_2)}(T)]\}^*, \tag{2.45}$$

$$2 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{O_2} = (-1) \cdot \{2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{O_2}) - \ln[K_{X(O_2)}(T)]\}^*, \tag{2.46}$$

$$2 \cdot \Delta_N - 1 \cdot \Delta_{N_2} = (-1) \cdot \{2 \cdot \ln(P_N) - \ln(P_{N_2}) - \ln[K_{X(N_2)}(T)]\}^*, \tag{2.47}$$

$$1 \cdot \Delta_C - 1 \cdot \Delta_U = (-1) \cdot \{\ln(P_C) - \ln(P_U) - \ln[K_{X(U)}(T)]\}^*, \tag{2.48}$$

$$\begin{aligned}
\text{для [C]} \quad & \frac{P_{CO}}{A} \Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{A} \Delta_{CO_2} + \frac{P_{CH_4}}{A} \Delta_{CH_4} + \frac{P_{C_U}}{A} \Delta_{C_U} + \frac{P_C}{A} \Delta_C - 1 \cdot \Delta_{M_T} = \\
& = (-1) \cdot [\ln(A) - \ln(M_T) - \ln(b_C)]^*,
\end{aligned} \tag{2.49}$$

$$\text{де } A = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + P_{C_U} + P_C.$$

$$\begin{aligned}
\text{для [H]} \quad & \frac{2 \cdot P_{H_2}}{B} \Delta_{H_2} + \frac{2 \cdot P_{H_2O}}{B} \Delta_{H_2O} + \frac{4 \cdot P_{CH_4}}{B} \Delta_{CH_4} + \frac{P_H}{B} \Delta_H - 1 \cdot \Delta_{M_T} = \\
& = (-1) \cdot [\ln(B) - \ln(M_T) - \ln(b_H)]^*,
\end{aligned} \tag{2.50}$$

$$\text{де } B = 2 \cdot P_{H_2} + 2 \cdot P_{H_2O} + 4 \cdot P_{CH_4} + P_H.$$

$$\begin{aligned}
\text{для [O]} \quad & \frac{P_{CO}}{B} \Delta_{CO} + \frac{2 \cdot P_{CO_2}}{B} \Delta_{CO_2} + \frac{P_{H_2O}}{B} \Delta_{H_2O} + \frac{2 \cdot P_{O_2}}{B} \Delta_{O_2} + \frac{P_O}{B} \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{M_T} = \\
& = (-1) \cdot [\ln(B) - \ln(M_T) - \ln(b_O)]^*,
\end{aligned} \tag{2.51}$$

$$\text{де } B = P_{CO} + 2 \cdot P_{CO_2} + P_{H_2O} + 2 \cdot P_{O_2} + P_O.$$

$$\text{для } [N] \frac{2 \cdot P_{N_2}}{\Gamma} \Delta_{N_2} + \frac{P_N}{\Gamma} \Delta_N - 1 \cdot \Delta_{M_T} = (-1) \cdot [\ln(\Gamma) - \ln(M_T) - \ln(b_N)]^*, \quad (2.52)$$

де $\Gamma = 2 \cdot P_{N_2} + P_N$.

і для замикаючого рівняння (2.34):

$$\begin{aligned} & \frac{P_{H_2O}}{D} \Delta_{H_2O} + \frac{P_{CO_2}}{D} \Delta_{CO_2} + \frac{P_{CO}}{D} \Delta_{CO} + \frac{P_{CH_4}}{D} \Delta_{CH_4} + \frac{P_{H_2}}{D} \Delta_{H_2} + \frac{P_{O_2}}{D} \Delta_{O_2} + \\ & + \frac{P_{N_2}}{D} \Delta_{N_2} + \frac{P_{C_U}}{D} \Delta_{C_U} + \frac{P_C}{D} \Delta_C + \frac{P_H}{D} \Delta_H + \frac{P_O}{D} \Delta_O + \frac{P_N}{D} \Delta_N = \\ & = (-1) \cdot [\ln(D) - \ln(1)]^* \end{aligned} \quad (2.53)$$

де $D = P_{H_2O} + P_{CO_2} + P_{CO} + P_{CH_4} + P_{H_2} + P_{O_2} + P_{N_2} + P_{C_U} + P_C + P_H + P_O + P_N$.

2.3 Верифікація моделі та алгоритму рішення

Пропонована модель та алгоритм рішення розглядаються як універсальні для дослідження процесів горіння та піролізу, як для газоподібних продуктів реакції, так і містять конденсовану фазу. Не передбачається спеціальних вимог до фазового стану вихідних речовин.

2.3.1 Верифікація на прикладі горіння метано-повітряної суміші

Верифікація модифікованого алгоритму та програми розрахунку проведена шляхом порівняння отриманих результатів з даними [105]. Довідник [105] обраний внаслідок широти інформації, що подається.

Розглянуто реакцію горіння метану (CH_4) у повітрі при коефіцієнті надлишку окислювача = 0,6; 0,7; 0,8. Компоненти паливної суміші та величина α обрані виходячи з:

- наявності у паливній суміші тих же хімічних елементів, що й у переважній більшості вихідних речовин як при їх спалюванні, так і піролізі;
- величина $\alpha < 1$ характеризує негативний кисневий баланс паливної

суміші, що відповідає схемі піролізу при подачі обмеженої кількості повітря або кисню.

Розрахунок процесу рівноважного перетворення паливної суміші в продукти згоряння будується на основі його ізоентальпійності. У процесі розрахунку енергетичний баланс може бути встановлений для заданого складу паливної суміші та певного набору продуктів згоряння. У таблиці 2.2 для вибраних значень α наведено значення температури продуктів згоряння, їх мольні частки з [105] та відповідні результати розрахунку

Таблиця 2.2 – Температура та склад продуктів згоряння суміші CH_4 +повітря для різних величин α . Склад у мольних частках.

Параметри		$\alpha=0,6$		$\alpha=0,7$		$\alpha=0,8$	
		[105]	Розрахунок	[105]	Розрахунок	[105]	Розрахунок
1	$T, [K]$	1784	1777	1958	1952	2098	2094
2	H	0	0	0,0002	0	0,0004	0
3	H_2	0,1137	0,1157	0,0677	0,0695	0,0348	0,0357
4	H_2O	0,1513	0,1496	0,1731	0,1723	0,1856	0,1850
5	N_2	0,5943	0,6021	0,6301	0,6382	0,6598	0,6689
6	CO	0,0988	0,0971	0,0771	0,0754	0,0537	0,0528
7	CO_2	0,0346	0,0356	0,0442	0,0446	0,0575	0,0576

Порівняння наведених величин показує гарний збіг даних з [105] та результатів розрахунків. Відносні похибки за складом не перевищують 2% – 3%, а температури – 0,4%. Мала величина похибок (у допустимому діапазоні точності для інженерних розрахунків, <5%) свідчить про коректність внесених змін у модель та алгоритм розрахунків. Наявна похибка може бути викликана відзнакою прийнятого в розрахунках складу паливної суміші від використаного [105]:

- у [105] враховувалася можливість домішки невеликої кількості водяної пари як у метані, так і в повітрі. Крім того, допускалася незначна домішка азоту метану. У складі повітря враховувалася наявність аргону та вуглекислого газу. У розрахунках ці інертні добавки замінили азотом;

- у [105] вказано джерело термодинамічних характеристик як вихідних

речовин, так і продуктів згоряння. Не вказаний спосіб їх застосування: табличні значення або у вигляді апроксимаційних залежностей. У розрахунках використані самі вихідні дані, але як апроксимаційних залежностей (поліноми 6 ступеня). Між табличними значеннями та апроксимаційними залежностями можливі незначні розбіжності.

Розглянута модифікована модель дозволяє визначати рівноважний склад суміші продуктів термодеструкції різного генезису при змінній їх температурі за постійного складу вихідних речовин. Компоненти суміші продуктів термодеструкції можуть бути як у газоподібному стані, так і в конденсованій фазі. Такою моделлю може бути описаний процес охолодження при їхньому рівноважному стані. У таблиці 3 наведено рівноважний склад суміші продуктів термодеструкції (у мольних частках) метану в повітрі при $\alpha=0,6$ в момент згоряння (перший стовпець) та при їх охолодженні (у процесі розширення). Склад продуктів згоряння таблиці 2.3 відображає можливість утворення конденсованої фази у вигляді сажі (C_U). Результати розрахунку, наведені у таблиці 2.2, а також дані [105], вказують на відсутність сажі у момент згоряння паливної суміші.

Таблиця 2.3 – Рівноважний склад продуктів згоряння суміші метану в повітрі ($\alpha=0,6$) за різної їх температури

$T, [K]$	1777	1300	900	400
H_2O	0,150	0,137	0,157	0,265
CO_2	0,036	0,049	0,069	0,026
CO	0,097	0,083	0,023	0,000
H_2	0,116	0,129	0,108	0,0002
N_2	0,602	0,602	0,602	0,602
C_{crb}	0,000	0,001	0,041	0,106

Наведені у таблиці 2.3 результати розрахунку вказують на появу та збільшення частки конденсованої фази зі зменшенням температури суміші продуктів згоряння. На малюнку 2.1 відображено характер зміни мольних часток C_U , CO_2 , CO у рівноважній суміші продуктів згоряння в процесі охолодження.

– У багатьох роботах розглядається реакція Будуара – Белла (реакція диспропорціонування) (2.54). Але в деяких відзначається її оборотність. При цьому при температурі до ~ 1300 К рівновагу практично повністю зміщено у бік утворення

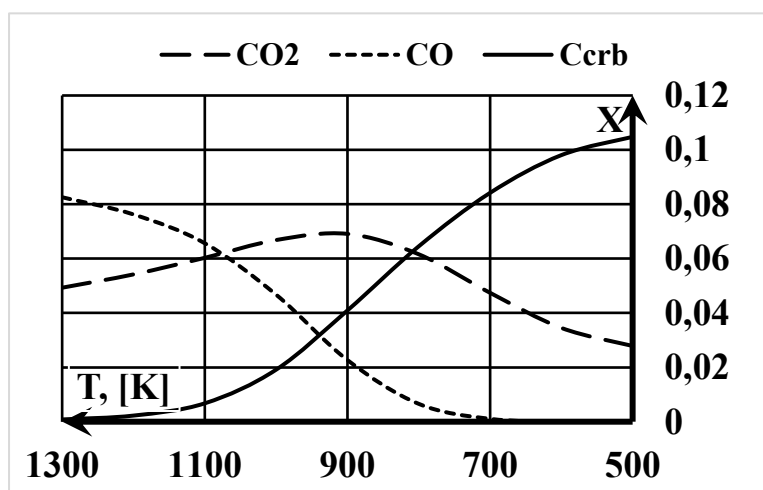


Рисунок 2.1 – Суміш метану з повітрям $\alpha=0,6$. Зміни мольних часток C_{crb} , CO_2 , CO у рівноважній суміші продуктів згоряння у процесі охолодження.

монооксиду вуглецю (CO).

Але зворотна реакція залишається екзотермічною.

В результаті виникає ситуація, коли в реальних умовах згоряння

вуглеводневого пального при нестачі окислювача та

зменшенні температури продуктів згоряння

утворюється монооксид вуглецю (CO).



Водночас розрахунки рівноважного складу такої суміші вказують на утворення деякої кількості вільного вуглецю (рис. 2.1). Це пов'язано з ендергонічністю реакції диспропорціонування CO до вільного вуглецю. При температурах ~ 400 К термодинамічна рівновага реакції Будуара – Белла зміщена у бік утворення вуглекислого газу та сажі. Цьому відповідають результати розрахунку (рис. 2.1). Але за нормальних умов (або близьких до них) монооксид вуглецю стійкий через малу швидкість реакції диспропорціонування.

Результати розрахунку (рис. 2.1) рівноважного складу вказують на одночасне

збільшення в температурному діапазоні 1300 -1000 До вільного вуглецю (C_U) та CO_2 при зменшенні CO . Це відповідає даним роботи [106], в якій зазначений температурний діапазон визначений як найбільш сприятливий для протікання диспропорціонування реакції монооксиду вуглецю. При подальшому зменшенні температури в рівноважному складі продуктів згоряння джерелом вільного вуглецю крім CO стає CO_2 (рис. 2.1). На це свідчить його зменшення.

Результати розрахунку на основі представленої модифікованої моделі відповідають даним, наведеним у роботі [107]. При зміні температури газоподібного монооксиду вуглецю (CO) до рівноважного складу продуктів може входити різна кількість конденсованої фази у вигляді сажі. Відповідно до результатів розрахунку реакції диспропорціонування з 1 м³ CO при температурах 650 0C і 500 0C може утворитися відповідно 209 гр. та 259 гр. сажі. Аналогічні результати відображені у [107, рис. 2].

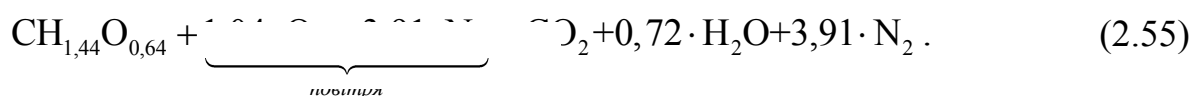
2.3.2 Верифікація на прикладі горіння-газифікації-повільного піролізу деревини сосни

Для перевірки достовірності моделі, яка застосовується в аналізі термохімічних перетворень твердих речовин, не вдалося виявити структуровані дані при великій різноманітності експериментів. Натомість були задіяні експериментальні дані, що описують діапазони змін концентрацій основних груп продуктів перетворень для вихідної деревної сировини, в даному випадку – сосни. Такі дані зазвичай доступні у більшості літературних джерел різних періодів. Саме тому їх було обрано для аналізу.

У процесі розрахунків використовується склад брутто-формули та ентальпія вихідної речовини, деревини сосни, які були визначені на основі непрямих даних. Хоча значення цих даних у різних джерелах близькі один до одного, вони все ж таки неоднакові і вказуються в певному діапазоні. Тому конкретне джерело їх значень у цій роботі не вказано. Передбачається, що до складу деревини сосни входять близько 49-50% вуглецю (C), 42-44% кисню (O) та 6-7% водню (H). Крім того, до складу деревини входить приблизно 0,1–1% азоту (N) і до 1% мінеральних компонентів

(зольність), проте ці речовини у проведених розрахунках не враховуються через їхню незначну концентрацію. В результаті, як брутто-формули вихідної сировини прийнята $CH_{1,44}O_{0,64}$. Жаропродуктивність абсолютно сухої деревини сосни в ряді джерел оцінюється на рівні 2100 °С (2370 К), що дозволило оцінити ентальпію вихідної сировини величиною -68,24 кДж/моль (-2880 кДж/кг). Результати розрахунку при різному значенні коефіцієнта надлишку окислювача наведено в таблиці 2.4.

Процес горіння при стехіометричному співвідношенні пального та окислювача розглядається як повне окислення горючих речовин. Для деревини сосни цей процес може бути описаний таким чином:



Результати розрахунку цього процесу на основі запропонованої моделі відображені в рядку таблиці 2.4 для $\alpha=1$.

Таблиця 2.4 – Температура та мольні частини продуктів горіння деревини сосни при різних значеннях коефіцієнта надлишку окислювача α

α	T, K	Концентрації (парціальний тиск, бар) продуктів реакції							
		CO	CO_2	H_2O	OH	H_2	N_2	O_2	NO
2,5	1409	0	0,077	0,055	0	0	0,749	0,119	0
2,2	1530	0	0,086	0,062	0	0	0,743	0,107	0
1,9	1681	0	0,099	0,071	0	0	0,736	0,092	0,0017
1,6	1870	0,0001	0,116	0,083	0	0	0,723	0,071	0,0028
1,3	2119	0,0015	0,139	0,100	0,002	0,0003	0,711	0,042	0,0043
1	2356	0,019	0,156	0,121	0,004	0,003	0,684	0,008	0,003
0,9	2371	0,040	0,150	0,128	0,003	0,007	0,667	0,002	0,0016
0,8	2316	0,072	0,134	0,132	0,0015	0,015	0,644	0	0
0,6	2071	0,153	0,093	0,125	0	0,052	0,577	0	0
0,4	1661	0,246	0,058	0,085	0	0,134	0,476	0	0
0,3	1348	0,303	0,043	0,048	0	0,201	0,406	0	0

У таблиці 2.4 представлений інший перелік продуктів згоряння, ніж (2.1).

Однак їх можна використовувати для порівняння з (2.55), визначивши кількість продуктів, що містять водень (H) і азот (N), що відносяться до одного молю речовини, що містить вуглець (C):

$$\frac{P_{H_2O} + P_{OH} + P_{H_2}}{P_{CO} + P_{CO_2}} = \frac{0,121 + 0,004 + 0,003}{0,019 + 0,156} = 0,731, \quad (2.56)$$

$$\frac{P_{N_2} + P_{NO}}{P_{CO} + P_{CO_2}} = \frac{0,684 + 0,003}{0,019 + 0,156} = 3,926. \quad (2.57)$$

Результати (2.56) і (2.57) відрізняються від даних з (2.55) менш ніж на 1,5%, проте вони більш інформативні. У таблиці 2.4 представлені розрахунки, що відбивають основні особливості процесів горіння та газифікації. Наприклад, температура продуктів реакції для $\alpha=0,9$ вище, ніж для $\alpha=1,0$. Це пояснюється тим, що збільшення обсягу азоту (N_2) у вигляді інертного газу більш впливає на температуру, ніж збільшення виділеної теплової енергії. Цей газ вимагає додаткового нагріву, але не бере участь у реакції згоряння. Результати також адекватно відображають зміну співвідношення між CO , CO_2 і H_2O при зміні при переході від спалювання до газифікації. Показано, що зі збільшенням вільного кисню (O_2) кількість оксидів азоту (NO) також збільшується. Однак, починаючи з певного значення α , кількість NO починає зменшуватися, незважаючи на збільшення вмісту кисню в продуктах реакції. Це з зниженням температури, що призводить до зниження освіти NO .

Подальше зниження значення параметра α , порівняно з даними таблиці 2.4, призводить до неможливості проведення процесу спалювання (газифікації). При $\alpha=0$, коли відсутній кисень, відбувається нагрівання вуглеводневого матеріалу, що викликає його суху перегонку або повільний піроліз. Результати розрахунку параметрів цього процесу з урахуванням запропонованої моделі представлені у таблиці 2.5. У складі продуктів реакції враховується додатковий компонент – вугільний залишок (U).

Експериментальні дослідження низькотемпературного (350–450 °С) повільного піролізу деревини показують утворення вуглеводневих речовин, що конденсуються, таких як оцтова кислота, смоли та інші. Цей ефект обумовлений відносно швидким видаленням продуктів розкладання із зони нагріву, що не дає високомолекулярним і стійким до термічної деструкції летких вуглеводнів повністю розкластися до простих. Цей процес більш помітний у швидких піролізних процесах. При підвищенні температури повільного піролізу або збільшенні часу перебування продуктів реакції в зоні нагріву кількість речовин, що конденсуються, знижується, іноді навіть до повного зникнення. У таблиці 2.5 наведено результати розрахунку параметрів саме такого процесу. У списку продуктів реакції відсутні вуглеводневі речовини, крім метану. Дослідження на основі запропонованої моделі швидких піролізних процесів з утворенням великої кількості речовин, що конденсуються, може бути предметом подальших досліджень. У літературних джерелах для повільного піролізу склад продуктів реакції зазвичай вказується в масових частках, і в таблиці 2.5 ці величини використовуються для відображення результатів розрахунків.

Таблиця 2.5 – Мольні частки продуктів піролізу деревини сосни при різних значеннях температури (T)

T, K	CO	CO_2	H_2O	CH_4	H_2	U
700	0,003	0,288	0,246	0,112	0,005	0,34
900	0,102	0,294	0,178	0,05	0,028	0,343
1100	0,490	0,125	0,067	0,06	0,051	0,255
1300	0,707	0,019	0,014	0,001	0,059	0,195
1500	0,744	0,003	0,003	0	0,060	0,184

Для перевірки адекватності отриманих результатів звернемося до основних характеристик повільного та високотемпературного піролізу, наведених у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Характеристики видів піролізу

Процес	Умови	Продукти, % мас.		
		Дистилят	Вугілля	Газ
Повільний піроліз	Температура (350–450 °C), тривалий процес	30 (води до 75 %)	35	35
Високотемпературний піроліз	Температура (>600 °C)	5 (смоли)	10	85

Результати розрахунку таблиці 2.5 відповідають повільному піролізу (таблиця 2.6) при температурі $T=700$ К. Відносна похибка розрахованої частки вугілля 34% відрізняється від експериментальних даних лише на 3%. Похибка розрахунку частки води ще менша і становить близько 1,5%. Для високотемпературного піролізу відмінність розрахункових значень більша, проте вона також не суперечить характеру даних. Важливо, що експериментальні дані представлені певного діапазону умов, тоді як розрахункові величини визначені для фіксованого значення температури.

Таким чином, результати розрахунків, що ґрунтуються на запропонованій єдиній моделі, адекватно відображають параметри різних процесів термохімічної конверсії вуглеводневих речовин: спалювання, газифікації, повільного піролізу. Відносна похибка обчислень вбирається у допустимих значень для інженерних розрахунків (<5%).

2.3.3 Валідація за складом продуктів згоряння

Верифікація алгоритму та програми розрахунку дозволяє оцінити ступінь впливу на результати розрахунків вибраного переліку продуктів згоряння. З цією метою виконані розрахунки щодо визначення температури та мольного складу для різного переліку можливих продуктів згоряння при незмінному складі вихідної паливної суміші метану та повітря. Розрахунки виконані для $\alpha=0,6$ і $\alpha=0,8$. Результати наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Температура та склад продуктів згоряння суміші метан+повітря для різних величин α .

Параметри		$\alpha=0,6$			$\alpha=0,8$		
		початковий	без H_2	додатк. компонент	початковий	без H_2	додатк. компонент
		1	2	3	1	2	3
1	T, [K]	1777	754	1848	2094	2071	2107
2	H	0	0,148	0	0	0	0
3	H_2	0,116		0,068	0,036		0,029
4	H_2O	0,150	0,171	0,144	0,185	0,221	0,182
5	N_2	0,602	0,558	0,607	0,669	0,669	0,670
6	CO	0,097	0,123	0,088	0,053	0,089	0,048
7	CO_2	0,036	0	0,049	0,058	0,022	0,063
8	NH_3			0,042			0,008
9	CH_2O			0,0003			0,0001
10	CH_4O			0,0005			0

Для проведення верифікації модифікованого алгоритму та програми розрахунку було виконано розрахунки для різних значень коефіцієнта надлишку повітря (α). У таблиці 2.3 подано розрахункові дані для базового варіанта. Для оцінки впливу результати розрахунків обраного переліку продуктів згоряння було проведено додаткові розрахунки. У стовпці 2 наведено результати, одержані при виключенні з розгляду водню. У стовпці 3 представлені результати розрахунків з урахуванням можливої присутності в продуктах згоряння водню, а також аміаку, формальдегіду та метанолу. Ці речовини розглядаються у деяких джерелах як можливі складові у продуктах згоряння. Порівняння результатів у стовпцях 2 та 3 з базовим варіантом (стовпець 1) дозволяє оцінити необхідність коректного визначення переліку речовин у суміші продуктів згоряння. За наявності значних розбіжностей можна дійти невтішного висновку про важливість обліку всіх релевантних компонентів при моделюванні процесів згоряння.

2.4 Імітаційна модель процесів піролізу та газифікації

2.4.1 Вибір схеми встановлення

У процесі вивчення фільтраційного горіння у сверхадіабатичному режимі часто використовуються макрокінетичні моделі [112]. При цьому зазначається [108–109], що за низьких швидкостей компонентів процеси перетворення стають майже рівноважними. Розрахунки рівноважних моделей враховують усі потоки ентальпії,

включаючи теплові втрати через стінки реактора у зовнішнє середовище. Для точного розрахунку теплових потоків від центральної зони реактора до його периферії необхідно враховувати зміни фізичних характеристик шихти в процесі термохімічних перетворень. Існують методи розрахунку цих характеристик [110], проте вони складні у застосуванні. Через незначність теплових втрат порівняно з основними тепловими потоками, що виникають у реакціях, їх часто не враховують у моделях рівноважних процесів. Втрати через стінки реактора можуть бути зменшеними або виключені за допомогою теплоізоляції та інших заходів, описаних у патенті [111].

Область дослідження, яка визначається як «фільтраційне горіння», у більшості джерел сприймається як процес окислення шихти киснем повітря. Ці екзотермічні реакції відіграють роль джерела теплової енергії, необхідної підтримки процесу горіння. У [108] згадується можливість використання водяної пари та діоксиду вуглецю в якості ендотермічних окислювачів, але основним окислювачем все ж таки залишається кисень повітря. Таким чином, кисень повітря є необхідним реагентом для підтримки екзотермічної реакції, що є джерелом теплової енергії.

При використанні органічних речовин як вихідна сировина може бути ще одне джерело теплової енергії. Розглянемо, наприклад, соснову деревину, оскільки її фізико-хімічні властивості добре вивчені та доступні. Надалі буде розглянуто можливість використання горючих речовин із змінним та невідомим складом. У відомих джерелах, що описують піроліз деревини, процес нагрівання деревини поділяється на кілька стадій із зазначенням температурних кордонів та напрямків відповідних енергетичних потоків [108]. Процес теплової обробки сировини можна поділити на три основні стадії:

1. **Сушіння сировини.** На першому етапі відбувається нагрівання до температури близько 150 °C. У цей час споживається енергія видалення вологи з сировини.

2. **Початкове розкладання.** На другому етапі температура підвищується приблизно до 300 °C (у деяких джерелах вказується до 400 °C). У цьому діапазоні температур починається розкладання матеріалу, що супроводжується виділенням

газоподібних продуктів та початком процесу обвуглювання.

3. Бурхливе розкладання. За подальшого підвищення температури відбувається інтенсивне розкладання сировини, що супроводжується виділенням значної кількості енергії.

Ці стадії відображають послідовність термічних процесів, що відбуваються при нагріванні матеріалу, починаючи з видалення вологи і закінчуючи інтенсивним розкладанням з вивільненням енергії. Теплова енергія, що виділяється на заключному етапі процесу, може бути застосована для підігріву шихти в режимі нададіабатичного нагріву.

Розглянемо схему (рис. 2.2) процесу фільтраційного спалювання органічних речовин у свержадіабатичному режимі [108]. Характерною особливістю даної

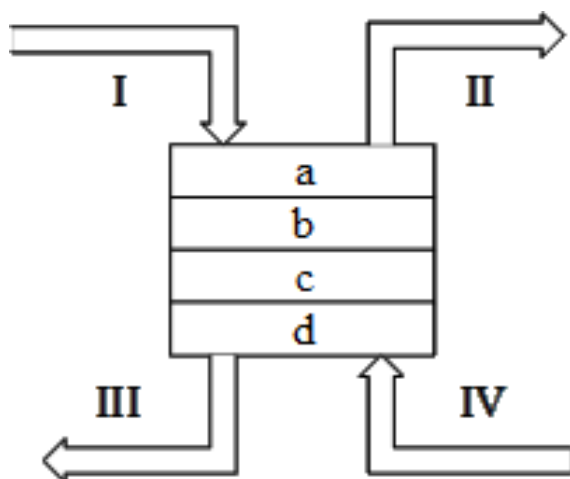


Рисунок 2.2 – Схема процесу фільтраційного спалювання органічних речовин: I шихта; II продукт-газ; III твердий залишок; IV - окислювач (повітря). a – зона сушіння; b – зона піролізу; c – зона окиснення; d – зона гарту.

схеми є зустрічний рух шихти та окислювача. Процес має свої переваги, але не позбавлений недоліків. У верхній частині реактора відбувається сушіння вихідної сировини (шихти). При подальшому русі вниз у міру нагрівання сировини починаються піролітичні процеси, що супроводжуються виділенням реакційної води. В результаті більша частина води видаляється з шихти потоком продукт-газу до того, як шихта потрапляє в зону окислення, що збільшує вміст вологи продукт-газу і знижує його якість. Для поліпшення якості газової суміші необхідне осушення та охолодження, що призводить до втрати значної частини енергії. У зоні окислення за високих температур відбуваються реакції коксового залишку з киснем, парами води та діоксидом вуглецю, утворюючи водень та оксид вуглецю. У зоні загартування твердий залишок охолоджується окислювачем, що подається, який при

цьому нагрівається. У цій схемі пари води разом з киснем і діоксидом вуглецю виступають як окислювач, що підвищує енергетичну цінність та обсяг продукт-газу, одночасно знижуючи кількість вугільного залишку. Однак, надходження в зону окислення зневодненої сировини зменшує кількість водню, що утворюється, що є недоліком даної схеми газифікації. У деяких випадках для збільшення частки CO і H_2 продукт-газу в окислювач додають пари води, що вимагає додаткових витрат енергії. Враховуючи описані особливості, пристрій, що працює за цією схемою, можна позиціонувати як реактор для спалювання різної сировини, включаючи малоенергетичну, з попутним утворенням деякої кількості горючих газів.

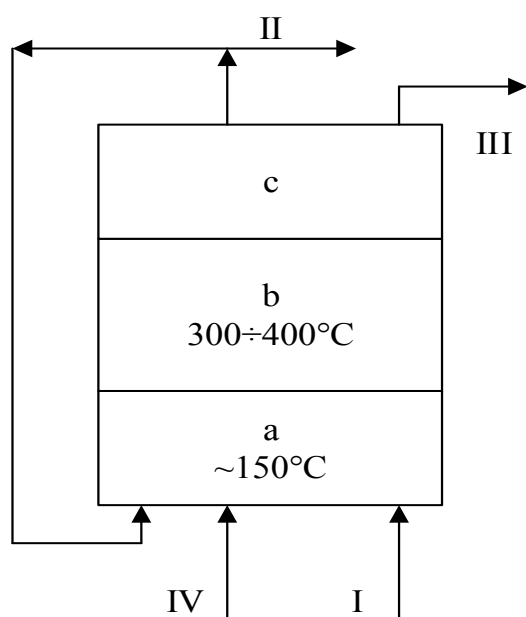


Рисунок 2.3 – Пропонована схема процесу фільтраційного спалювання органічних речовин: I – шихта; II – продукт-газ; III – твердий залишок; IV – окислювач (повітря). а – зона сушіння; б – зона піролізу; с – зона окислення.

Для підвищення теплотворної здатності та збільшення обсягу горючих газів, що утворюються при піролізі (газифікації), запропоновано нову схему руху шихти та газових потоків. Згідно з традиційною схемою процесу, теплова енергія виділяється в зоні окислення. Ця енергія використовується для сушіння та видалення із зони реакції. Ідея нової схеми процесу (рис. 2.3) полягає в тому, що сушіння та нагрівання вихідної сировини здійснюється продуктами реакції після зони окислення в супутньому потоці. Продукти реакції (продукт-газу) при високій температурі подаються на вхід камери разом з вихідною сировиною, і далі вони рухаються в одному напрямку. В результаті продукти сушіння та

початкового розкладання надходять у зону окислення, вносячи з собою енергію, необхідну для їхнього утворення. Якщо продукт, що подається на вхід реактора по рециркуляційній лінії, буде достатньо енергії для сушіння і нагрівання вихідної

сировини до температури зони попереднього піролізу (300–400 °C), почнеться виділення енергії та саморозкладання деревини. Цей процес збігається із зоною окислення, де відбувається відновлення CO_2 та H_2O до CO та H_2 за рахунок кисню. У разі нестачі енергії та необхідності підвищення температури продукт-газу на виході з реактора, на його вході може подаватися необхідна кількість окислювача (повітря).

2.4.2 Оцінка працездатності рівноважної моделі піролізу

Вихідна сировина, проходячи через процес повільного піролізу або газифікації, піддається хімічним реакціям, що визначають склад кінцевих продуктів. Важливим чинником у процесі є як хімічний склад вихідного органічного матеріалу, а й його вологість. Таким чином, кількість не пов'язаної хімічно води в сировині істотно впливає на склад одержуваних продуктів. Для забезпечення єдиних методів опису процесів піролізу та газифікації з додаванням повітря як окислювач необхідно розробити уніфікований підхід до визначення складу вихідної сировини. З урахуванням цих особливостей пропонується розглядати вихідну сировину як однорідну речовину [12], [17], брутто-формула якої залежить від вмісту води та кількості повітря. Для наочного прикладу моделі використовується абсолютно суха деревина сосни з брутто-формулою $CH_{1.44}O_{0.64}N_{0.009}$. Вода у складі сировини враховується як мольна частка, що позначається символом ϕ . Наприклад, при $\phi=0.1$ до 0.9 моль деревини додається 0.1 моль води, що змінює брутто-формулу вихідної речовини $C_{0.885}H_{1.504}O_{0.681}N_{0.008}$. Додавання повітря також впливає на зміну брутто-формули сировини та враховується як мольна частка від складу деревини з доданою водою. Для спрощення розрахунків склад повітря приймається як суміш кисню (21%) і азоту (79%) з брутто-формулою $O_{0.42}N_{1.58}$. Наприклад, при додаванні $\alpha=0.1$ повітря брутто-формула вихідної сировини $C_{0.885}H_{1.504}O_{0.681}N_{0.008}$ (деревина + $\phi=0.1$ води) змінюється відповідно до $C_{0.592}H_{1.006}O_{0.595}N_{0.528}$. У процесі розрахунку визначається температура рівноважної суміші продуктів реакції, при якій її ентальпія стає рівною ентальпії вихідної речовини.

У дослідженні [108] зазначається, що у зоні окислення (рис. 2.2)

спостерігається температурний діапазон від 1000 до 1200 °С. Це призвело до того, що під час проведення розрахунків розглядалася температура до 1500 К у зоні рівноважних реакцій. При цьому модель не обмежує цей параметр. Отримані результати розрахунків рівноважних температур при різних комбінаціях ступеня зволоженості вихідної сировини (ϕ) та кількості повітря, що подається (α) представлені в таблиці 2.8. Ці дані свідчать про те, що при використанні

Таблиця 2.8 – Рівноважні температури при різному поєднанні α і ϕ

ϕ	α			
	0	0.1	0.2	0.3
0	1020	1095	1170	1310
0.1	1090	1140	1260	1500
0.2	1160	1340	1415	
0.3	1240	1380		
0.4	1380	1420		

та $\phi=0.4$ - 1420 К (~ 1150 °С).

Запропонована схема (рис. 2.3) відрізняється тим, що потребує значного енерговитрат на підготовку сировини. Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати енергію частини продуктів реакції для регенеративного нагріву

Таблиця 2.9 – Частка необхідної енергії від наявної при різному поєднанні α і ϕ

ϕ	α			
	0	0.1	0.2	0.3
0	0,67	0,61	0,55	0,44
0.1	0,82	0,73	0,58	0,41
0.2	0,88	0,61	0,53	
0.3	0,89	0,65		
0.4	0,77	0,68		

100°С, а також для випаровування і нагрівання пари, що утворилася. Результати розрахунків представлені у таблиці 2.9 у вигляді відношення необхідної енергії до наявної. Ці значення показують, яку частину продуктів реакції необхідно використовуватиме підтримки процесу.

запропонованої схеми (рис. 2.3) температури в зоні окислення можуть досягати

значень, наведених у роботі [108], навіть без подачі повітря або за його низького рівня. Наприклад, при $\alpha=0$ (тобто без повітря) та $\phi=0.4$ температура досягає 1380 К (~ 1100 °С), а при $\alpha=0.1$

вихідної сировини до початку самовільної температури реакції. Температура цього процесу становить ~ 400°С для деревини.

Для визначення необхідної енергії та наявної енергії проведено розрахунки для значень α та ϕ , поданих у таблиці 2.8. Ці розрахунки враховували енергію, необхідну для нагрівання деревини, повітря і води до

Дослідження процесу піролізу включає аналіз різних характеристик, у тому числі вугільного залишку, що є важливим показником. Зменшення цього залишку може бути досягнуто за рахунок використання різних окислювачів. Цей вибір окислювача істотно впливає енергетичну цінність одержуваних продуктів. Використання кисню з повітря сприяє підвищенню температури в реакційній зоні, що стимулює процес, проте призводить до збільшення окислення продуктів та зниження їхньої енергетичної цінності. З іншого боку, водяні пари, що вводяться в реакційне середовище, сприяють утворенню компонентів синтез-газу, що збільшує

енергетичну цінність продуктів. Однак цей процес потребує додаткових енерговитрат. Таблиця 2.9 надає дані про витрати енергії під час використання різних окислювачів, що дозволяє оцінити ефективність різних підходів. Таблиця 2.10 містить результати розрахунків кількості вугільного залишку для різних

Таблиця 2.10 – Кількість вугільного залишку при різному поєднанні α та ϕ

ϕ	α			
	0	0.1	0.2	0.3
0	0,67	0,61	0,55	0,44
0.1	0,82	0,73	0,58	0,41
0.2	0,88	0,61	0,53	
0.3	0,89	0,65		
0.4	0,77	0,68		

значень параметрів ϕ та α . Величини дано в молях вугільного залишку на 1 моль вихідної речовини. Подані дані демонструють можливість повного окислення вугільного залишку при мінімальному або без використання кисню з повітря. Це підтверджує перспективність альтернативних методів проведення реакції піролізу з погляду енергетичної ефективності та енерговитрат.

Результати у табл. 2.8 – табл. 2.10 одержані для речовин табл. 11.

Таблиця 2.11 – Брутто-формули вихідних речовин при різному поєднанні α та ϕ

ϕ	α			
	0	0.1	0.2	0.3
0	$C_1H_{1,44}O_{0,64}N_{0,009}$	$C_{0,668}H_{0,962}O_{0,567}N_{0,531}$	$C_{0,501}H_{0,722}O_{0,530}N_{0,792}$	$C_{0,401}H_{0,578}O_{0,508}N_{0,950}$
0.1	$C_{0,885}H_{1,504}O_{0,681}N_{0,008}$	$C_{0,592}H_{1,006}O_{0,595}N_{0,528}$	$C_{0,445}H_{0,756}O_{0,551}N_{0,790}$	$C_{0,356}H_{0,605}O_{0,525}N_{0,948}$
0.2	$C_{0,794}H_{1,556}O_{0,714}N_{0,007}$	$C_{0,532}H_{1,042}O_{0,617}N_{0,527}$	$C_{0,400}H_{0,783}O_{0,568}N_{0,788}$	
0.3	$C_{0,714}H_{1,6}O_{0,743}N_{0,0064}$	$C_{0,479}H_{1,073}O_{0,637}N_{0,525}$		
0.4	$C_{0,654}H_{1,634}O_{0,765}N_{0,0059}$	$C_{0,439}H_{1,097}O_{0,652}N_{0,524}$		

2.4.3 Склад продуктів піролізу

З детальних розрахунків із визначенням складу продуктів піролізу чи газифікації залежно від температури, в табл. 2.8 – табл. 2.10 представлені узагальнені величини. У даному модельному випадку відомий склад вихідної речовини (деревина сосни), включаючи його вологість, що дозволяє виявити основні особливості процесу. Далі показано, як запропоновані методи розрахунку можуть бути застосовані до ситуації з невідомим складом органічної речовини, що піролізується.

Процес піролізу деревини сосни (без доступу повітря) розглядається на прикладі двох різних вологостей. На рис. 2.4 показано зміну складу продуктів піролізу ($\alpha=0$) залежно від температури випадку $\varphi=0$. Слід зазначити, що в реальності абсолютно сухої деревини не існує, проте цей випадок є цікавим з теоретичної точки зору через його граничність. Через рівноважність аналізованої реакції ентальпія вихідної сировини (в даному випадку відома величина) дорівнює ентальпії продуктів піролізу, що дозволяє визначити рівноважну температуру реакції. Результати розрахунку зміни ентальпії продуктів реакції представлені на рис. 2.5.

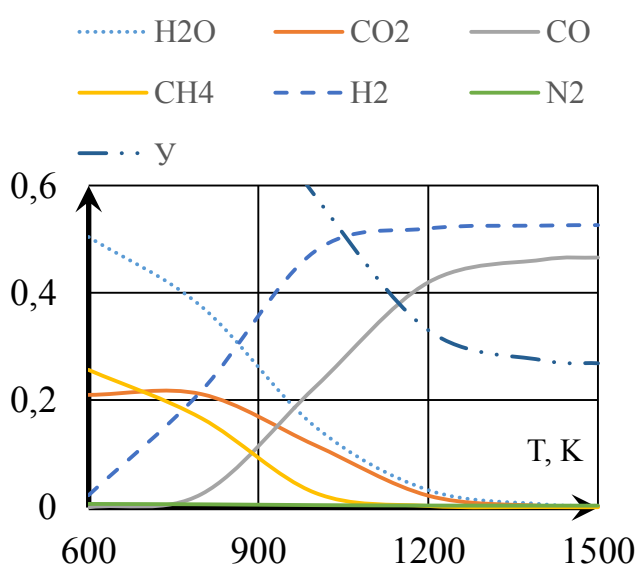


Рисунок 2.4 – Молильні частки продуктів піролізу в залежності від температури (T, K) при $\varphi=0$ та $\alpha=0$

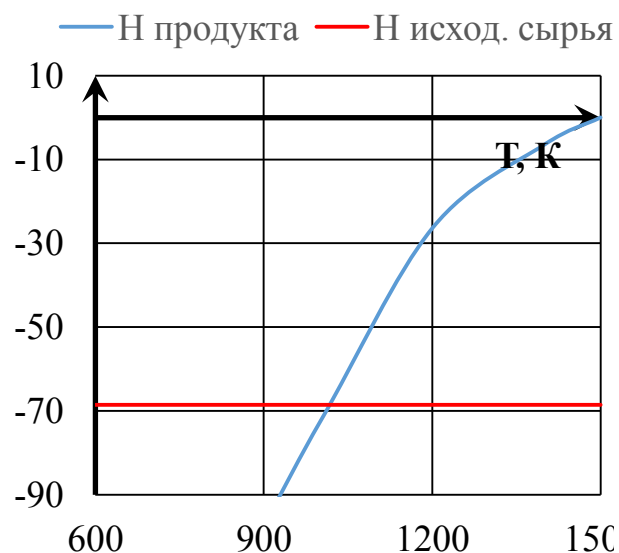


Рисунок 2.5 – Ентальпія продуктів піролізу (кДж/моль) залежно від температури (T, K) при $\varphi=0$ та $\alpha=0$

На рисунках 2.6 та 2.7 представлені подібні результати піролізу для вологої деревини при $\alpha=0$ та значення коефіцієнта ($\phi=0,4$).

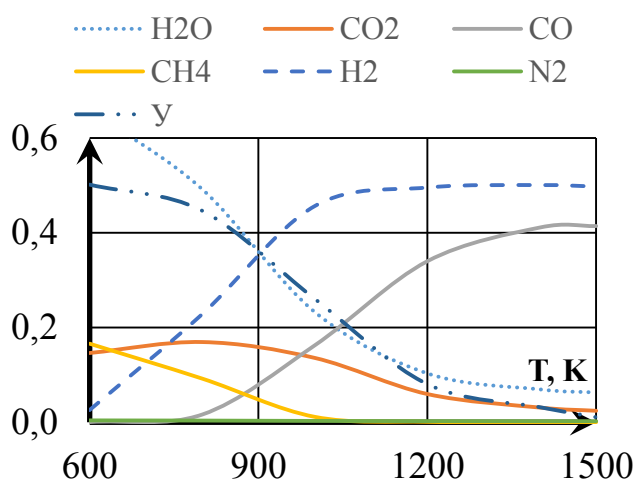


Рисунок 2.6 – Молильні частки продуктів піролізу в залежності від температури (T, K) при $\phi=0,4$ та $\alpha=0$

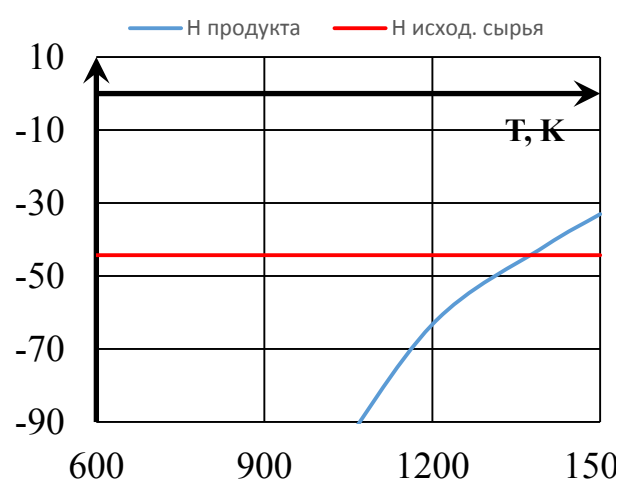


Рисунок 2.7 – Ентальпія продуктів піролізу (кДж/моль) залежно від температури (T, K) при $\phi=0,4$ та $\alpha=0$

З графіків рис. 2.5 і 2.7 видно, що процес піролізу для вологої деревини досягає рівноваги при вищій температурі, близько 1350 K, порівняно з абсолютно сухою деревиною, де рівновага досягається при приблизно 1000 K. Це означає, що для ініціювання піролізу вологою деревиною необхідна більш висока температура, і це може відбуватися без зовнішніх джерел тепла завдяки нададіабатичний процес піролізу, описаному на рис. 2.3. Це свідчить про можливість проведення термічних високотемпературних реакцій з вологими органічними речовинами без доступу кисню. Це підтверджується випадками самозаймання буртів вугілля, зерна, деревних відходів та інших матеріалів. Важливо, що у разі звичайного горіння деревини спостерігається зворотна ситуація: температура горіння сухої деревини вища, ніж вологою.

Виходячи з порівняння результатів розрахунків, представлених на рис. 2.4 та 2.6, можна помітити приблизно однакову концентрацію мольних часток горючих газів, таких як водень (H_2) та окис вуглецю (CO), при однакових температурах. Цей

факт примітний з огляду на те, що частка вуглецю в сухій деревині (як показано в таблиці 2.11) вище, ніж у вологій. При піролізі сухої деревини значна частина продуктів реакції є вугільний залишок. Зменшення частки вугільного залишку при переробці вологої сировини відбувається завдяки окисленню, викликаному паровим розкладанням наявної води та кисню з вуглекислого газу. Цей процес відіграє ключову роль у збереженні концентрації водню та окису вуглецю при зменшенні частки вуглецю у вихідній сировині. Цей ефект особливо помітний при порівнянні складів продуктів реакції для відповідних температур рівноважних процесів у першому та другому випадках.

Перехід від процесу піролізу до газифікації, особливо в режимі нагadiaбатичного фільтраційного горіння, має істотний вплив на склад продуктів реакції, навіть при невеликій кількості повітря, що використовується. При цьому виявляється різке зниження частки горючих газів, таких як водень (H_2) та оксид вуглецю (CO), у цих продуктах. Слід зазначити, що за однакових умов, включаючи рівень вологості та коефіцієнт надлишку повітря, спостерігається підвищення температури реакції та майже повна газифікація залишку вугілля. Ці зміни

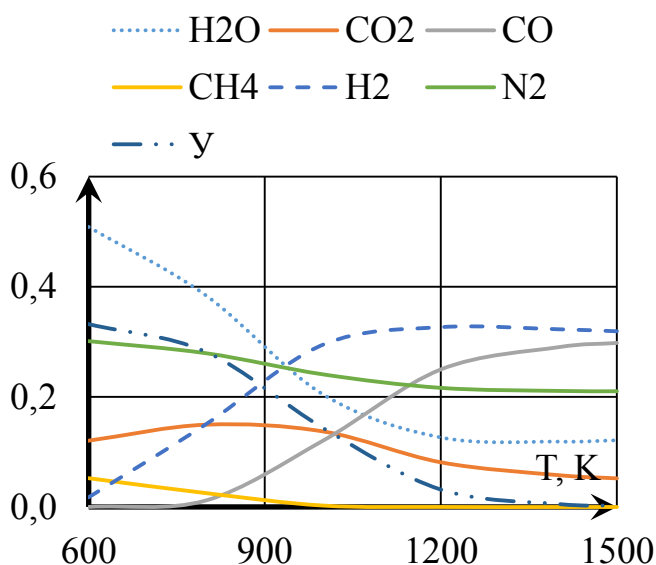


Рисунок 2.8 – Мольні частки продуктів піролізу в залежності від температури (Т, К) при $\varphi=0,4$ та $\alpha=0,1$

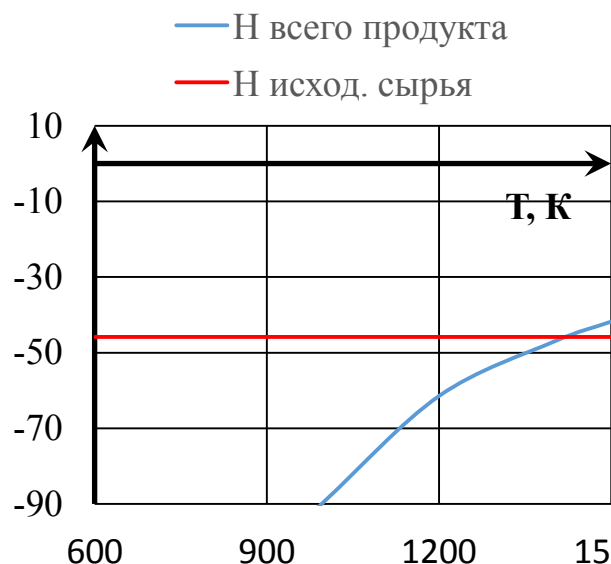


Рисунок 2.9 – Ентальпія продуктів піролізу (кДж/моль) залежно від температури (Т, К) при $\varphi=0,4$ та $\alpha=0,1$

відображені на графіках, представлених на рис. 2.8 та 2.9 для деревини з вологістю $\varphi=0.4$ та при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha=0,1$.

Наведені результати показують, що для повної газифікації вугільного залишку при термічній переробці навіть вологих органічних речовин може знадобитися певна кількість повітря. Однак, щоб отримати максимальний вихід горючих газів, кількість повітря має бути мінімально необхідною. Це особливо важливо у разі змінного складу вихідної сировини, де процес подачі повітря має бути ретельно контрольованим. Для цього необхідно знати склад сировини у кожний момент часу.

2.5 Ідентифікація бруutto-формули та ентальпії продуктів термодеструкції у процесі їх допалювання

Розв'язання технічних задач базується на переліку вихідних даних. Їхні кількісні характеристики можуть бути задані й підтримуватися постійними або визначені шляхом прямих вимірювань у процесі роботи. Але це не завжди можливо. Так кількісні характеристики складу речовин у процесі роботи можуть змінюватися, а можливості їх визначення відсутні. Або принципово вони піддаються вимірюванню, але не можуть бути забезпечені з необхідною оперативністю. У всіх випадках може бути використаний підхід, пов'язаний із розв'язанням зворотних задач. У процесі його реалізації за заміряними параметрами прояву деяких процесів необхідно визначити, наприклад, склад вихідних речовин або характеристики елементів, що входять до складу розглянутого об'єкта. При цьому відомі якісний склад речовин (набір хімічних елементів) або перелік елементів і порядок їхнього зчленування. Необхідно визначити їхні кількісні характеристики.

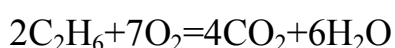
В роботі [13] розглядається метод визначення змінного складу суміші газоподібного пального в процесі його спалювання. На відміну від сертифікованого пального змінність складу зумовлена використанням альтернативних джерел газоподібного пального, у тому числі таких, що не породжують парникового ефекту (газогенераторні, піролізні гази відходів деревообробки, сільськогосподарських відходів, коксові, доменні гази тощо).

2.5.1 Спосіб заповнення бібліотеки рішень прямої задачі у вигляді робочого тривимірного масиву

На етапі підготовки до визначення брутто-формули палива необхідно здійснювати заповнення бібліотеки рішень для прямої задачі з варіюванням кількох параметрів. Ці параметри включають можливу кількість атомів відповідних елементів у брутто-формулі палива (наприклад, b_C , b_H , b_O , b_N), можливі величини коефіцієнта надлишку окисника α та ентальпії палива It .

Кількість інтервалів зміни цих параметрів може бути обрана довільно, і для конкретності приймемо її рівною 100. Це дасть змогу відстежувати зміну кожної з величин b_C , b_H , b_O , b_N в інтервалі, наприклад, 0,05... 4,95 з кроком 0,05, величини α - в інтервалі 0,025... 2,5 з кроком 0,025. Це потребуватиме $(100)^6=10^{12}$ розв'язань прямої задачі з фіксацією всіх результатів. На цьому етапі можливе скорочення мірності задачі.

Так для прикладу стехіометричний процес горіння етану (і будь-якої іншої речовини) може бути організовано як на основі його повної формули, так і за нормованої кількості атомів:



або



Тут нормування проведено за кількістю атомів вуглецю. У брутто-формулі кількість атомів не обов'язково є цілим числом, і нормування може бути виконано щодо будь-якого хімічного елемента. У цій задачі застосовано нормування за вуглецем, де кількість атомів вуглецю фіксована й дорівнює 1 і брутто-формула визначається таким чином:

$$C_1 H_{(b_H/b_C)} O_{(b_O/b_C)} N_{(b_N/b_C)} \quad \text{або} \quad C_1 H_{d_H} O_{d_O} N_{d_N}. \quad (2.59)$$

Таким чином, кількість рішень прямої задачі в результаті знижується до $(100)^4 = 10^8$ реалізацій.

На наступному етапі запропонований метод використовується для перетворення отриманих результатів у форму, зручну для подальшого використання під час пошуку розв'язку на основі проведених технологічних вимірювань температури ПЗ і об'ємних витрат пального та окисника:

1. Шляхом варіювання d_H , d_O , d_N і з (2.59) для кожної реалізації розв'язання прямої задачі задається певний склад пального. Для кожного випадку визначається мольний стехіометричний коефіцієнт співвідношення компонентів χ_0 . Зміна величини коефіцієнта надлишку окислювача α перераховується у зміну відношення вимірюваних технологічних параметрів I^* .

2. За всіх можливих сполучень вихідних даних I^* (α), d_H , d_O , d_N і I_t , що виникають під час варіювання їхніх величин, виконується спроба розв'язання прямого завдання з визначення температури ПЗ. У низці випадків співвідношення складу палива і його ентальпії є несумісним, і такі варіанти виключаються з розгляду.

3. Для решти (успішних) реалізацій розв'язання прямої задачі сукупність вихідних даних d_H , d_O , d_N і I_t подають у вигляді одного числа, використовуючи позиційний принцип подання десяткових чисел.

Спочатку дані записуються в нормованому вигляді:

$$\bar{d}_H = \frac{d_H - d_H^l}{d_H^r - d_H^l} \cdot 100. \quad (2.60)$$

Тут d_H - кількість атомів водню в розглянутій реалізації прямої задачі; d_H^l , d_H^r - ліва і права межі розглянутого інтервалу зміни величини кількості атомів водню при

розв'язанні прямої задачі. Отримані значення об'єднуються в одне число « E » шляхом встановлення на відповідні його розряди (рис. 2.10). Хоча порядок

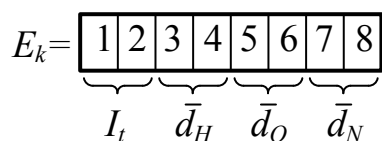


Рисунок 2.10. Схема позиційного подання у вигляді єдиного числа нормованих значень вихідних даних

формування цього числа може бути будь-яким, прийнемо, що в перші два розряди поміщається значення I_t . У результаті формуються комплекси, у яких кожній парі значень результатів розв'язання прямої задачі (T і $\dot{I}$) відповідає одне число « E » з упакованими значеннями відповідних їм вихідних

даних;

4. Результати розрахунку (T і $\dot{I}$) структуруються. Визначаються їх $\max [T^r, (\dot{I}^r)]$ і $\min [T^l, (\dot{I}^l)]$ значення. Діапазони змін цих величин розбиваються на певну кількість інтервалів. Кількість інтервалів і величина кроку зміни кожної величини співвідносяться з технологічною точністю вимірювання (T і $\dot{I}$) у процесі спалювання палива

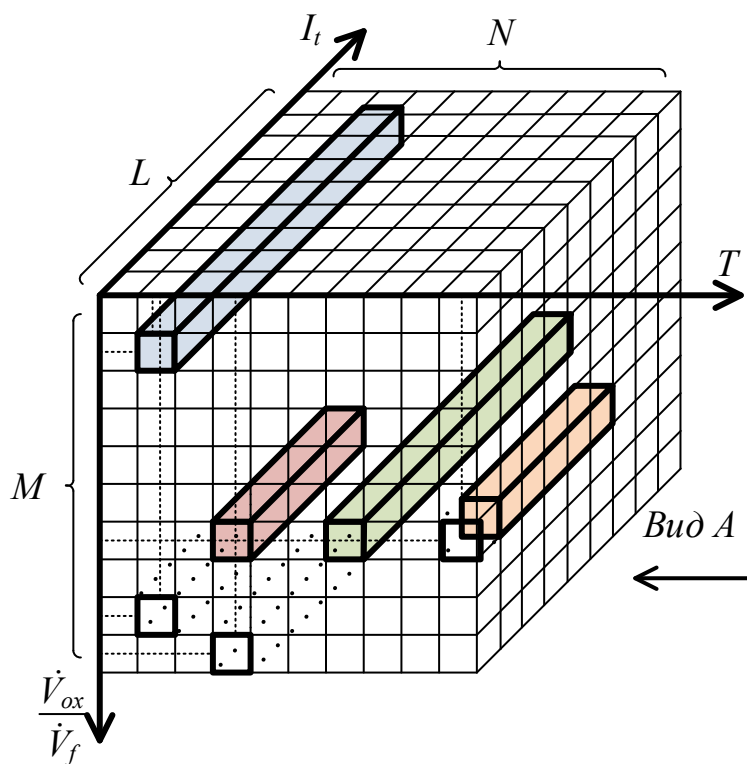


Рисунок 2.11. Схема формування структурованого робочого тривимірного масиву на основі вихідних даних і результатів розв'язання прямої задачі

5. Результати розв'язання (T і $\dot{I}$) прямої задачі та відповідні їм вихідні дані, зведені в єдине число « E », використовуються для формування тривимірного масиву (рис. 2.11).

6. Кожній комірці відповідає вектор розмірності L (рис. 2.11), елементами якого є числа « E ». Величина числа визначається значенням у першому (старшому) розряді. У цьому випадку значення в перших розрядах пов'язані з величиною ентальпії. Тому вісь

векторів позначена як вісь ентальпій I_t .

Параметри L , M , N , визначаються виходячи з необхідної точності розгляду відповідних величин. Прийнемо, наприклад, що $N=M=100$. У цьому разі на площині $T - I_t$ формується 10^4 комірки. За кількості реалізацій розв'язання прямої задачі 10^8 кожній комірці можуть відповідати результати $\sim 10^8/10^4=10^4$ розв'язань. Аналогічна кількість пов'язаних із цими розв'язками чисел « E_k » розміщуються в елементах відповідних векторів.

7. В елементах вектора розміщуються значення « E_k », які перебувають у відповідних їм межах:

$$E_k \in [(I_t^l)_k, (I_t^r)_k]. \quad (2.61)$$

Оскільки не всі комбінації складу палива ($\bar{d}_H$, $\bar{d}_O$, $\bar{d}_N$) можуть бути реалізовані при розглянутому переліку величин ентальпій I_t , деякі елементи векторів виявляються незаповненими. Елементи векторів упорядковано в порядку зростання. Приклади заповнення деяких векторів наведено на рис. 2.11 і позначено кольором.

Таким чином, шляхом розв'язання комплексу прямих задач і подальшого опрацювання результатів сформовано тривимірний масив. Величини, що містяться в цьому масиві, можуть бути використані для визначення складу різних видів палива. Особливо важливо, щоб брутто-формула цих палив містила хімічні елементи, які використовувалися під час формування робочого масиву. Слід зазначити, що в брутто-формулі можуть бути відсутні деякі елементи. Наприклад, масив, який ми розглядаємо, може слугувати основою для визначення складу як кисневмісних, так і безкисневих вуглеводнів, під час їхнього горіння в повітрі та в кисні (без азоту).

2.5.2 Метод пошуку рішення при використанні даних робочого тривимірного масиву

Метод визначення складу палива, що використовує сформований робочий тривимірний масив, містить такі кроки:

1) вимірюється температура ПС T_i для різних величин відношення об'ємних витрат окислювача і пального $(\dot{V}_{ox}, \dot{V}_f)_i$. Кількість вимірювань визначається кількістю визначуваних величин. Так у випадку палива виду (2.59) необхідно визначити 4 величини $(\bar{d}_H, \bar{d}_O, \bar{d}_N, I_t)$ і, відповідно, виконати 4 комплекти вимірювань.

2) На підставі проведених вимірювань, на площині $T - \dot{V}_{ox}, \dot{V}_f$ робочого тривимірного масиву визначають 4 комірки (виділені штриховими лініями рис. 2.11) і пов'язані з ними вектори (виділені кольором). У кожному векторі в E_k записано всі можливі комбінації визначуваних величин $(\bar{d}_H, \bar{d}_O, \bar{d}_N, I_t)$, які забезпечують температуру T_i при $(\dot{V}_{ox}, \dot{V}_f)_i$.

3) Визначаються проекції обраних векторів на площину $\dot{V}_{ox}, \dot{V}_f - I_t$ (вид А, рис. 2.11), точніше на вісь I_t (рис. 2.12).

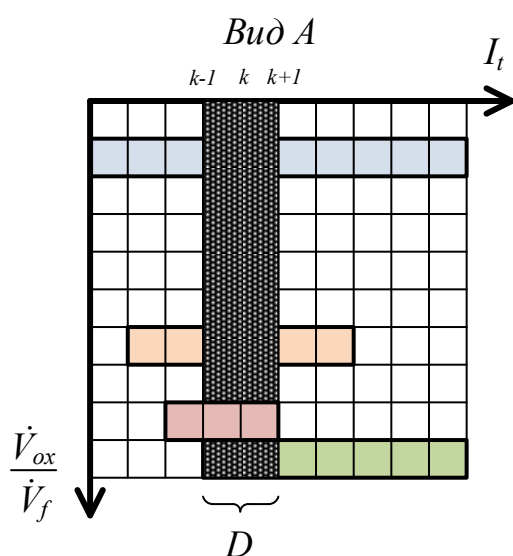


Рисунок 2.12. Приклад проекції вибраних векторів

4) Оскільки за будь-яких співвідношень зміни об'ємних витрат склад і ентальпія визначуваного палива залишаються постійними, мають бути однаковими і відповідні їм величини чисел E_k у всіх розглянутих векторах. Тому визначається область D перетину множини елементів кожного вектора (рис. 2.12). Елементи векторів, що виходять за межі області, видаляються.

$$E_k = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ \hline \end{array}$$

$\underbrace{\quad\quad\quad}_{\bar{d}_H} \quad \underbrace{\quad\quad\quad}_{\bar{d}_O} \quad \underbrace{\quad\quad\quad}_{\bar{d}_N} \quad \underbrace{\quad}_{I_t}$

Рисунок 2.13. Схема позиційного

Подальші дії спрямовані на зменшення ширини області до 1 елемента, що й визначить шукане рішення.

5) Відібрані числа (область D , рис. 2.12) перебудовуються в стековому порядку. У старші

представлення у вигляді єдиного числа нормованих значень вихідних даних після їхньої перебудови

розряди переносяться значення наступної визначуваної величини (рис. 2.13).
Значення зі старших розрядів (рис. 2.10) переносяться в кінець числа.

Перебудовані числа сортуються в результаті чого, утворюється схема подібна до наведеної на рис. 2.12.

6) Дії з пункту 4 повторюються доти, доки не будуть використані всі величини зі списку визначуваних $(I_t, \bar{d}_H, \bar{d}_O, \bar{d}_N)$. При кожному проході кількість чисел E_k , що залишилися, зменшується. Зрештою залишається одне значення E_k , в якому визначувані параметри $(I_t, \bar{d}_H, \bar{d}_O, \bar{d}_N)$ відповідають усім заміряним T_i за заданих $i = 1, 2, \dots, n$. Це і є рішенням.

2.5.3 Приклади розв'язання задач визначення складу палива. Імітація технологічних вимірів без урахування приладових похибок

Вихідні дані у вигляді технологічних вимірів імітувалися результатами розв'язання прямої задачі для відповідних речовин. Розглянуто два варіанти завдання вихідних даних:

Було прийнято такі діапазони зміни вихідних даних:

$$\exists \bar{d}_H \in [0 \dots \quad (\bar{d}_H)_i = \Delta d \cdot (i-1) \quad \Delta d = 0,05 \quad \forall i \in [1 \dots$$

$$\exists \bar{d}_O \in [0 \dots \quad (\bar{d}_O)_i = \Delta d \cdot (i-1) \quad \Delta d = 0,05 \quad \forall i \in [1 \dots$$

– коефіцієнт надлишку окислювача α :

$$\exists \alpha \in [0,025 \dots \quad \alpha_i = 0,025 + \Delta \alpha \cdot (j-1) \quad \Delta \alpha = 0,025 \quad \forall j \in [1 \dots$$

– ентальпія палива I_t :

$$\exists I_t \in [-13500 \dots \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} : (I_t)_i = -13500 + \Delta I_t \cdot (i-1)$$

$$\Delta I_i = 100 \quad \forall i \in [1 \dots$$

Таким чином, було виконано $2,24 \cdot 10^8$ рішень прямої задачі. На це було витрачено кілька годин при роботі персонального комп'ютера з такими параметрами Intel Core i5-4590 3.3 ГГц, 32 ГБт RAM, HDD 2 ТБт. Для кожної комбінації вихідних даних було розраховано температури ПЗ, а також перераховано коефіцієнти надлишку окисника α щодо об'ємних витрат окисника і пального $I'_{\text{окисника}}$ та $I'_{\text{палива}}$. Частина комбінацій вихідних даних виявилася несумісною, що було виявлено в процесі розв'язання. Після видалення цих несумісних комбінацій було сформовано робочий масив даних. При використанні текстового формату для його розміщення знадобилося $\sim 2,7$ ГБт пам'яті. Після переведення в бінарний вигляд обсяг зменшився до 1,2 ГБт.

2.6 Висновки до розділу

Модифіковано модель та алгоритм розрахунку процесу рівноважної термодеструкції органічних речовин. Основною зміною стало використання мольних часток визначення рівноважного складу продуктів реакції, включаючи як газоподібну, і конденсовану фази. Це потребувало коригування лінеаризованих рівнянь закону діючих мас та замикаючого рівняння для врахування конденсованої фази.

Константи хімічної рівноваги, які зазвичай наводяться для парціальних тисків, були адаптовані для мольних часток, що дозволило використовувати їх у модифікованій моделі.

Для оцінки точності методу була виконана верифікація та валідація на прикладі розрахунку складу продуктів згоряння, що включають газоподібну та конденсовану фази. Отримані результати показали високу відповідність з існуючими даними для газоподібних продуктів горіння. Крім того, було демонстровано відповідність змін у кількості конденсованої фази при зміні температури.

Виявлено, що вибір компонентів продуктів згоряння має значний вплив на

точність визначення їх кількісного складу та температури. Це підкреслює важливість правильного складання переліку компонентів для достовірних розрахунків.

Також розроблено імітаційну модель процесів піролізу та газифікації, спрямовану на отримання продукт-газу з максимальною теплотворною здатністю при мінімальній кількості вугільного залишку за різного складу вихідної сировини. Мінімізація вугільного залишку визначає можливість отримання максимально можливого обсягу суміші горючих газів. Максимальна теплова продуктивність обумовлена оптимізацією процесу переробки у сверхадіабатичному режимі з мінімальним використанням повітря як окислювача.

Для заповнення бібліотеки розроблено метод структурованого і компактного розміщення результатів рішення прямих задач. Розроблено метод пошуку складної задачі інтерпретації з даних сформованого робочого тривимірного масиву шляхом застосування обмежень і послідовного виділення областей збігу даних. Такий підхід дає змогу на кожному кроці багаторазово зменшувати обсяг аналізованих величин і за обмежену кількість кроків залишити єдиний результат, що відповідає шуканому рішенню. У цьому полягає відмінність пропонованого методу від використовуваного раніше методу прямого перебору даних бібліотеки.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ПОБУДОВИ ЛІНІЙНОЇ АПРОКСИМАЦІЙНОЇ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Показано необхідність використання моделей не тільки на стадії теоретичних досліджень і проектних робіт, але і при дослідженні вже існуючих об'єктів [14]. Проаналізовано способи їх побудови на основі методів ідентифікації. Відзначено використання методів ідентифікації для визначення параметрів процесів і об'єктів. Підкреслено складність визначення структури моделей. Запропоновано метод визначення структури моделі довільного об'єкта як апроксимуючої сукупності лінійних диференціальних моделей. В якості вихідних даних використані реакції об'єкта на зовнішній вплив.

3.1 Алгоритм подання одновимірної апроксимаційної моделі об'єктів керування

Для опису динамічних характеристик процесів та об'єктів управління використовуються моделі на основі диференціальних рівнянь. Одним з найпотужніших і загальноприйнятих засобів їх вирішення є використання методу інтегральних перетворень. Застосування такого підходу дозволяє звести диференціальні рівняння до алгебраїчних і спростити їх перетворення та вирішення. Різноманітність властивостей інтегральних перетворень визначається їх кількістю, що налічує кілька десятків видів (більше двадцяти). Але існують і загальні риси. Так, практично всі інтегральні перетворення є оборотними і за наявним зображенням може бути відновлений оригінал. Крім того, інтегральні перетворення є лінійними операторами. Ці особливості визначили спосіб і вид рішення в результаті використання розробленого методу:

– основні перетворення виконуються з більш простими виразами у просторі зображень;

– результат представляється у вигляді сукупності рішень лінійних рівнянь.

Для вирішення диференціальних рівнянь і дослідження властивостей об'єкта управління та систем автоматичного регулювання на практиці часто використовується математичний апарат передаточних функцій. Для переходу від оригіналів функцій до передаточних функцій і назад у теорії автоматичного управління традиційно застосовується перетворення Лапласа.

Нижче представлена послідовність дій, яка реалізує алгоритм представлення апроксимаційної моделі об'єктів управління. В якості вихідних даних при вирішенні прямої задачі використовується верифікована математична модель об'єкта управління (задана у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь, у вигляді передаточних функцій або матриць у просторі станів). Далі для ілюстрації алгоритму використовується апарат передаточних функцій.

При заданні певного вхідного впливу визначається реакція на нього досліджуваної системи. При використанні моделі, записаної за допомогою системи лінійних (лінійаризованих) диференціальних рівнянь, такий хід вирішення у просторі зображень записується у вигляді:

$$f_{ex}(p) = W(p) \cdot f_{ent}(p), \quad (3.1)$$

де $f_{ent}(p)$ – зображення вхідного сигналу; $f_{ex}(p)$ – зображення вихідного сигналу, $W(p)$ – передавальна функція.

Передавальна функція відображає всі рівняння, що входять до моделі (структури моделі) і всі їх параметри. Використання запису рішення у вигляді (3.1) дозволяє вирішити і зворотну задачу: при заданому вхідному впливі $f_{ent}(p)$ і фіксації реакції на нього досліджуваної системи $f_{ex}(p)$ визначити передавальну функцію $W(p)$ досліджуваного об'єкта. Реакція системи на зовнішнє вплив може бути отримана в ході експерименту. Формалізація її запису може бути виконана, наприклад, шляхом апроксимації за допомогою ряду. У цьому випадку при вирішенні зворотної задачі слід говорити про визначення передавальної функції досліджуваного об'єкта у вигляді її апроксимації. Виходячи з цього, алгоритм визначення апроксимації

передавальної функції об'єкта будується наступним чином.

На першому етапі на вхід досліджуваного об'єкта подається зовнішній вплив. Він може мати різний вигляд. У даному випадку для визначеності прийнято вплив у вигляді функції Хевісайда з зображенням

$$f_{ent}(p) = \frac{1}{p}. \quad (3.2)$$

На другому етапі фіксується реакція системи на виході. Отримані дані апроксимуються степеневим рядом, наприклад, за допомогою методу найменших квадратів. За умовами застосування перетворення Лапласа для отримання реакції системи в нульовий момент часу розглядається з стану спокою. Тому апроксимаційний поліном не повинен мати вільного члена. У загальному вигляді його запис може бути представлений як:

$$f_{ex}(t) = \sum_{i=1}^n c_i t^i, \quad (3.3)$$

де t – час, c_i – коефіцієнти апроксимуючого полінома; i – номер члена апроксимуючого полінома. Кількість членів ряду обирається виходячи з необхідної точності апроксимації.

На третьому етапі, застосовуючи перетворення Лапласа до ряду (3.3) у просторі зображень, отримуємо степеневий (обмежений) ряд такого вигляду:

$$f_{ex}(p) = \sum_{i=1}^n c_i \frac{i!}{p^{i+1}} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot i! \cdot \left(\frac{1}{p}\right)^{i+1}. \quad (3.4)$$

На четвертому етапі передаточна функція записується у загальному вигляді раціонального дробу:

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots} + 1. \quad (3.5)$$

На п'ятому етапі, підставляючи (3.2), (3.4) та (3.5) у вираз (3.1), отримуємо вираз такого виду:

$$\sum_{i=1}^n c_i \cdot i! \cdot \left(\frac{1}{p}\right)^{i+1} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots}{a_n p^{n+1} + a_{n-1} p^n + \dots} + \frac{1}{p}. \quad (3.6)$$

На шостому етапі чисельник і знаменник у правій частині (3.6) діляться на величину члена зі знаменника з максимальною ступенем за p . У цьому випадку це $a_n p^{n+1}$. В результаті отримаємо:

$$\sum_{i=1}^n c_i \cdot i! \cdot \left(\frac{1}{p}\right)^{i+1} = \frac{\frac{b_m}{a_n} \cdot \frac{1}{p^{n-m+1}} + \frac{b_{m-1}}{a_n} \cdot \frac{1}{p^{n-m+2}} + \dots}{1 + \frac{a_{n-1}}{a_n} \cdot \frac{1}{p} + \frac{a_{n-2}}{a_n} \cdot \frac{1}{p^2} + \dots} \cdot \frac{\frac{1}{a_n} + \frac{b_0}{a_n} \cdot \frac{1}{p^{n+1}}}{\frac{1}{p^{n-1}} + \frac{1}{a_n} \cdot \frac{1}{p^n}}, \quad (3.7)$$

або

$$\sum_{i=1}^n c_i \cdot i! \cdot \left(\frac{1}{p}\right)^{i+1} = \frac{\sum_{j=m}^0 \frac{b_j}{a_n} \cdot \left(\frac{1}{p}\right)^{n+1-j}}{1 + \sum_{i=n-1}^1 \frac{a_i}{a_n} \cdot \left(\frac{1}{p}\right)^{n-i} + \frac{1}{a_n} \cdot \left(\frac{1}{p}\right)^n}. \quad (3.8)$$

На сьомому етапі проводиться заміна $1/p=z$:

$$\sum_{i=1}^n c_i \cdot i! \cdot z^{i+1} = \frac{\sum_{j=m}^0 \frac{b_j}{a_n} \cdot z^{n+1-j}}{1 + \sum_{i=n-1}^1 \frac{a_i}{a_n} \cdot z^{n-i} + \frac{1}{a_n} \cdot z^n}. \quad (3.9)$$

Вираз (3.9) є записом апроксимації Паде. У лівій частині - обмежений степеневий ряд з усіма відомими коефіцієнтами. У правій частині - раціональний дріб, за допомогою якого цей ряд апроксимується.

На восьмому етапі, відповідно до методу апроксимації Паде, визначаються всі невідомі коефіцієнти у знаменнику правої частини (3.9). Коефіцієнти подані у вигляді комплексів (a_i/a_n) та відношень $(1/a_n)$. З $(1/a_n)$ визначається величина (a_n) , а з її допомогою з (a_i/a_n) визначаються величини (a_i) .

На дев'ятому етапі визначаються коефіцієнти чисельника правої частини рівняння (9). Вони представлені у вигляді комплексів (b_i/a_n) . Використовуючи значення (a_n) , визначаються величини коефіцієнтів b_i . Знання коефіцієнтів (a_i) та (b_i) дозволяє записати передавальну функцію у вигляді (3.5), а на її основі - апроксимаційну модель у просторі оригіналів у вигляді комплексу лінійних звичайних диференціальних рівнянь.

3.2 Метод визначення одновимірної апроксимаційної моделі об'єктів керування

Як демонстраційний приклад розглянемо апроксимацію динамічних властивостей газопроводу, що подає газ на спалювання в енергетичному котлі. Схема ділянки показана на рис. 3.1, а.

Витрата газу вимірюється в певному перетині газопроводу і порівнюється з його заданим значенням. Сформований у результаті цього керуючий вплив регулятора впливає на регулювальний клапан CV . Газ надходить із колектора C , у якому підтримується постійний тиск P_1 , і через регулюючий клапан, газопровід, запірний клапан і пальник B подається в другий акумулятор (топку), де підтримується постійний тиск P_2 . Зазвичай регулюючий орган розташовано поблизу колектора, збурюючий клапан DV - безпосередньо біля пальника. Таким чином, відрізок газопроводу, який треба враховувати під час розрахунків, укладений між регулювальним і збурюючим клапанами. Тому за розрахункову приймається схема, показана на рис. 3.1, б.

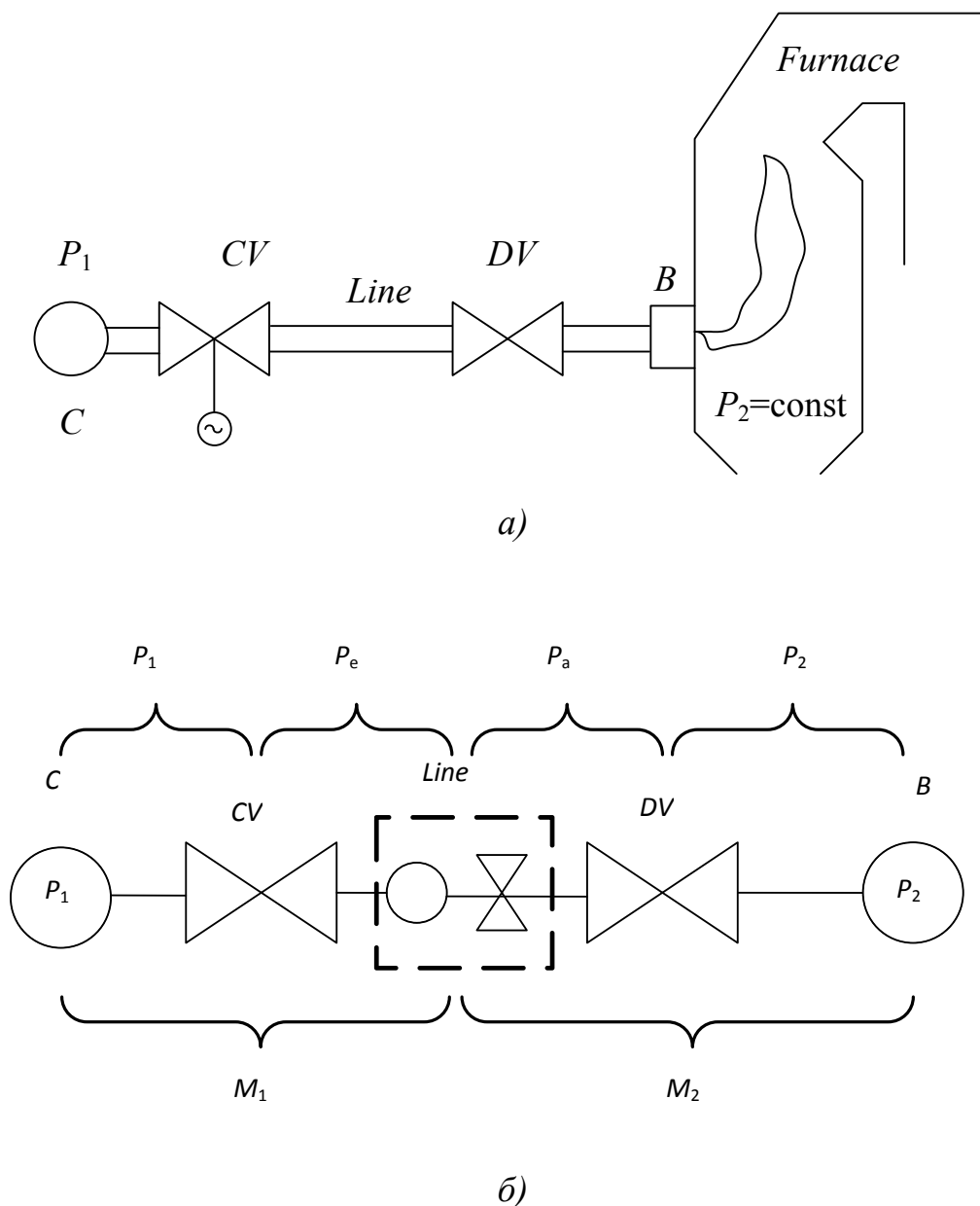


Рисунок 3.1 – Схема ділянки регулювання витрати газу в котел.

Під час виведення моделі приймають такі допущення й обмеження:

- модель вважають лінійною. Лінеаризацію моделі проведено за допомогою розкладання функцій у ряд Тейлора і відкиданням усіх членів ряду, що вищі за перший;
- для відповідності моделі реальному процесу відхилення технологічних параметрів від номінальних значень не повинні перевищувати 10 %;

– з точки зору гідрогазодинаміки середовище вважається нестисливим, це дає змогу застосовувати модель із зосередженими параметрами;

– описується системою лінійних диференціальних рівнянь;

– рішення диференціальних рівнянь перебувають у вигляді відхилень від номінальних значень, тобто за нульових початкових умов.

Тоді можна записати властивості окремих елементів ділянки:

- для регулювального клапана (за докритичних перепадів тиску)

$$\Delta P_l - \Delta P_e = a_{CV} \Delta M_l - b_{CV} \Delta S_{CV}, \quad (3.10)$$

причому $\Delta P_l = 0$;

– для газопроводу

$$\frac{M}{2P} TP'_e + \frac{1}{a_l} \Delta P_e = \Delta M_l - \frac{1}{a_l} \Delta P_a, \quad (3.11)$$

$$a_l \frac{\bar{M}}{\bar{P}} TM'_2 + \Delta M_2 = -\frac{\bar{M}}{\bar{P}} TP'_a + \Delta M_1; \quad (3.12)$$

– для збурюючого клапана (при докритичних перепадів тиску)

$$\Delta P_2 - \Delta P_a = a_{DV} \Delta M_2 - b_{DV} \Delta S_{DV}, \quad (3.13)$$

причому $\Delta P_2 = 0$.

Для стисливого середовища при докритичному витіканні через клапан відхилення перепаду тиску $\Delta \Delta P_{CV}$ на ньому визначається виразом:

$$\Delta \Delta P_{CV} = a_{CV} \Delta M - b_{CV} \Delta S_{CV}, \quad (3.14)$$

$$\text{где } a_{CV} = \frac{2K_{CV}\bar{M}}{\bar{S}_{CV}^2}, \quad b_{CV} = -\frac{2K_{CV}\bar{M}^2}{\bar{S}_{CV}^3}.$$

Зміна втрат тиску в лінії газопроводу визначається виразом:

$$\Delta\Delta P_l = 2K_l\bar{M}\Delta M, \quad (3.15)$$

тоді $a_l = 2K_l\bar{M}$.

У рівняннях (3.10) – (3.15) прийнято такі позначення:

M – усталена номінальна витрата газу;

P – усталений номінальний тиск газу;

ΔSCV – площа прохідного перерізу регулювального клапана;

ΔSDV – площа прохідного перерізу збурювального клапана;

$T = \alpha \frac{m}{\bar{M}}$ – постійна часу теплообмінних процесів, пов'язаних зі зміною тиску

газу під час його руху в трубі;

α – коефіцієнт, що враховує неідеальність теплообмінного процесу.

У системі рівнянь (3.10)-(3.15) величина ΔSCV являє собою вхідну величину (регулювальний вплив), ΔM_2 - вихідну величину (регульована величина); ΔSDV - зовнішній збурюючий вплив; ΔM_1 , ΔP_e і Δp_a - проміжні параметри, які не становлять інтересу в цьому випадку. Під час розв'язання системи їх потрібно виключити.

Виключення цих параметрів і перетворення системи в одне рівняння - проста, хоча й трудомістка операція. Математичні викладки, пов'язані з перетворенням, опущені. Після виконання необхідних дій було отримано таке рівняння:

$$\begin{aligned} a_2 M_2'' + a_1 M_2' + a_0 \Delta M_2 = \\ = e_1 \Delta S'_{CV} + e_0 + \Delta S_{CV} + z_2 \Delta S''_{CV} + z_1 \Delta S'_{DV} + z_0 \Delta S_{DV}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

де

$$a_2 = [a_{CV} a_l (a_l + 2a_{DV})] c^2 ; \quad c = \left(\frac{\bar{M}}{2\bar{P}} T \right) ;$$

$$a_1 = 2a_{CV} a_l + 2a_{CV} a_{DV} + 2a_{DV} a_l + a_l^2 ;$$

$$a_0 = a_{CV} + a_{DV} + a_l ;$$

$$e_1 = a_l B_{CV} c ; \quad e_0 = B_{CV} ;$$

$$z_0 = B_{DV} ; \quad z_1 = 2(a_{CV} + a_l) B_{DV} c ; \quad z_2 = 2B_{DV} a_{CV} a_l c^2 .$$

Таким чином можна отримати передавальну функцію, яка описує властивості газопроводу по каналу «переміщення регулювального клапана – витрата газу»:

$$W_{\Delta S_{PK} \rightarrow \Delta M_2}(S) = \frac{e_1 S + e_0}{a_2 S^2 + a_1 S + a_0} ; \quad (3.17)$$

Під час практичних розрахунків налаштувань регуляторів враховується тільки значення коефіцієнта e_0 (відповідає коефіцієнту передачі об'єкта) і значення коефіцієнтів знаменника передавальної функції. Також під час розрахунку налаштувань регулятора необхідно враховувати інерційність виконавчого механізму. Це можна зробити шляхом додавання інерційної ланки першого порядку в канал керування.

Таким чином, газопровід, яким подають газ на спалювання в топці котла, за каналом керування може бути описано у вигляді двох послідовно з'єднаних інерційних ланок першого і другого порядків із передавальними функціями вигляду:

$$W(p) = \left(\frac{1}{1 \cdot p + 1} \right) \cdot \left(\frac{5}{3^2 \cdot p^2 + 3 \cdot p + 1} \right) . \quad (3.18)$$

Числові значення коефіцієнтів було отримано під час пусконаладжувальних випробувань котла, встановленого у виробничо-опалювальній котельні.

Крім того, передавальною функцією вигляду (3.18) в [113] описано паровий тракт під час моделювання системи керування котлом. А в [114] подібним чином описано модель електрогідравлічної системи з клапаном турбіни високого і низького тиску під час розроблення контролера для системи керування турбіною парової сонячної електростанції.

Вигляд перехідної характеристики наведено на рис. 3.2.

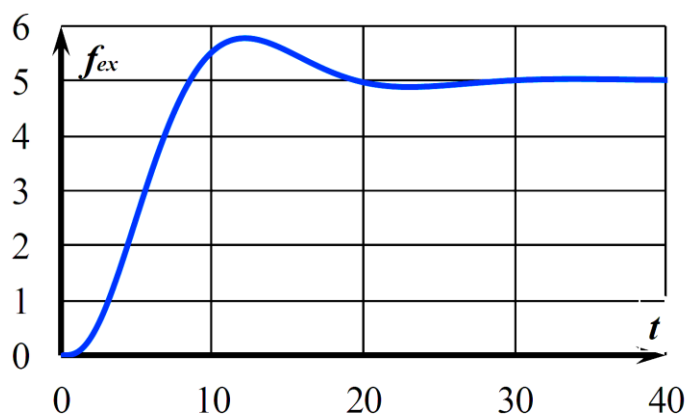


Рисунок 3.2 – Перехідна характеристика реакції об'єкта, модель якого представлена передавальною функцією (3.18), на ступінчасте збурення

Ці дані були апроксимовані для отримання виразу виду (3.3) за методом найменших квадратів за допомогою полінома 10 ступеня. Порядок полінома обумовлений можливістю адекватної апроксимації розглянутої розгінної характеристики (рис. 3.1). Залежно від ступеня складності її виду порядок полінома може бути іншим. У цьому разі було поставлено умову відхилення величин, отриманих на основі апроксимаційної залежності від вихідних даних (рис. 3.1), не більше ніж на 2 %.

Відносна похибка апроксимації в розглянутому діапазоні не перевищує 0,6 %.

Похибка визначена відносно величини усталеного режиму ($f_{ex}=5$).

На основі цих даних отримано коефіцієнти (a_i) і (b_i) апроксимувальних передавальних функцій (3.5) для різних ступенів знаменника. Для четвертого ступеня вона має вигляд:

$$W(p) = \frac{5 \cdot (-1.14766 \cdot p^3 + 1.86912 \cdot p^2 + 4.03141 \cdot p + 0.951226)}{57.9304 \cdot p^4 + 62.8619 \cdot p^3 + 29.8244 \cdot p^2 + 7.70912 \cdot p + 1} . \quad (3.19)$$

На основі отриманої передавальної функції може бути побудована система лінійних звичайних лінійних диференціальних рівнянь, що апроксимують.

Для оцінки похибки апроксимації, застосувавши зворотне перетворення Лапласа, знайдемо розв'язок у просторі оригіналів за одиничного ступінчастого впливу:

$$\begin{aligned} f_{ex}(t) = & (0.246755 + 2.64605 \cdot j) \times \\ & \times \exp[(-0.381805 - 0.135624 \cdot j) \cdot t] \cdot \\ & + (0.246755 - 2.64605 \cdot j) \times \\ & \times \exp[(-0.381805 + 0.135624 \cdot j) \cdot t] \cdot \\ & - (2.62481 + 2.61405 \cdot j) \times \\ & \times \exp[(-0.160759 - 0.281611 \cdot j) \cdot t] \cdot \\ & - (2.62481 - 2.61405 \cdot j) \times \\ & \times \exp[(-0.160759 + 0.281611 \cdot j) \cdot t] + 4.75612 . \end{aligned} \quad (3.20)$$

Тут j – уявна одиниця.

Порівняння результатів розрахунку на підставі (20) і вихідних даних показало, що відносна похибка апроксимації не перевищує 5,5 % в усьому розглянутому діапазоні. Похибка визначена відносно величини усталеного режиму ($f_{ex}=5$).

Як правило, під час опрацювання експериментально отриманих кривих розгону об'єкта керування, структура моделі обирається дослідником (налагоджувальником)

із набору стандартних на основі суб'єктивних суджень. Виходячи з цього, існує неоднозначність у визначенні структури моделі об'єкта управління. Пропонований підхід дає змогу формалізувати визначення виду моделі.

При побудові апроксимуючої передавальної функції (3.19) не висувалося жодних вимог до характеру процесу, що розглядається, і вихідним «експериментальним» даним при його описі. Результати дослідження показали можливість використання запропонованого методу отримання апроксимаційної моделі об'єкта управління. За цих умов одержана максимальна похибка апроксимації рішення не виходить за допустимі межі при інженерних розрахунках. Для визначення можливих причин похибок розглянемо (рис. 3.3) зміну вихідних даних і результатів розрахунку більш тривалому, ніж наведений на рис. 3.2, проміжку часу.

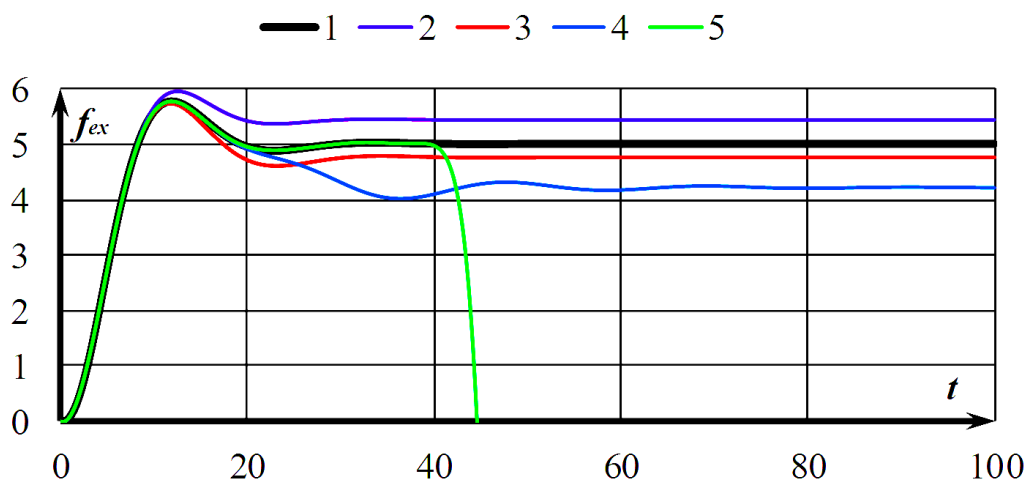


Рисунок 3.3 – Відображення реакції об'єкта управління, що моделюється, на ступінчасту дію: 1 – експериментальна крива розгону; 2 – багаточлен третього ступеня знаменника передавальної функції; 3 – багаточлен четвертого ступеня знаменника передавальної функції; 4 – багаточлен шостого ступеня знаменника передавальної функції; 5 – вихідний апроксимуючий поліном 10 ступеня (3)

Тут:

– залежності (2) – (4) отримані на основі аналітичного рішення виду (20) апроксимаційних моделей з передавальною функцією виду (5) при виборі для

апроксимації відповідно третього, четвертого та шостого ступенів багаточлена у знаменнику;

– залежність 5 отримана на основі полінома десятого ступеня виду (3), використаного для апроксимації розгінної характеристики (3.18) при імітації вихідних даних.

Модель з передавальною функцією, знаменник якої має четвертий ступінь – рис. 3.3, залежність (3), з меншою похибкою описує досліджуваний процес, ніж модель з третім ступенем – рис. 3.3, залежність (2). Але шостий ступінь у знаменнику передавальної функції призводить до суттєвого збільшення похибки апроксимації. Це означає наявність оптимального порядку апроксимуючої передавальної функції (і, відповідно, моделі у просторі оригіналів). Слід враховувати значення вихідних даних, розрахованих за допомогою апроксимуючого полінома – рис. 3.3, залежність (5). Вони адекватно відображають експериментальні вихідні дані лише до моменту часу 40 с. Подальше їх відхилення від вихідних експериментальних даних може бути причиною збільшення похибки апроксимації Паде (3.7) зі зростанням порядку передавальної функції – рис. 3.3, залежність (5). У цьому випадку зростає похибка даних, отриманих в результаті апроксимації поліномом, а не похибка математичної моделі. Незважаючи на характер вихідних даних для апроксимації Паде – рис. 3.3, залежність (5), слід зазначити властивості перехідних характеристик апроксимаційних моделей – рис. 3.3, залежності (2)–(4). Вони не суперечать вихідним експериментальним даним на всьому розглянутому проміжку часу.

Для підтвердження отримання апроксимаційної моделі об'єкта, а не процесу, розглянемо реакцію об'єкта з тією ж вихідною моделлю при подачі на вхід впливу іншого виду, що обурює. Як апроксимаційну модель приймемо передатну функцію (3.19), а як вхідний вплив – сигнал виду $f_{ent}=e^{-t}$. Такий сигнал можна вважати наближенням реального імпульсного впливу з поданням у просторі зображень у вигляді:

$$f_{ent} = \frac{1}{p+1} . \quad (3.21)$$

У цьому випадку диференціальне рівняння, отримане з передавальної функції (3.18) і розглянуте як вихідна модель об'єкта при заданому впливі, матиме вигляд:

$$9 \cdot f_{ex}''' + 12 \cdot f_{ex}'' + 4 \cdot f_{ex}' + f_{ex} = 5 \cdot e^{-t} . \quad (3.22)$$

Його аналітичне рішення:

$$f_{ex}(t) = -\frac{5}{49} \cdot e^{-t} \cdot \left(-7t - 11\sqrt{3} \cdot e^{\frac{5t}{6}} \cdot \sin\left(\frac{t}{2\sqrt{3}}\right) + 15 \cdot e^{\frac{5t}{6}} \cdot \cos\left(\frac{t}{2\sqrt{3}}\right) - 15 \right) . \quad (3.23)$$

Апроксимаційна модель у просторі зображень при використанні передавальної функції (3.19) та впливу (3.21) має вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{f}_{ex}(p) = \\ = (5) \cdot \left(\frac{-1.14766 \cdot p^3 + 1.86912 \cdot p^2 + 4.03141 \cdot p + 0.951226}{57.9304 \cdot p^4 + 62.8619 \cdot p^3 + 29.8244 \cdot p^2 + 7.70912 \cdot p + 1} \right) \cdot \left(\frac{1}{p+1} \right) . \end{aligned} \quad (3.24)$$

Застосувавши зворотне перетворення Лапласа, знайдемо рішення у просторі оригіналів при заданому впливі:

$$\begin{aligned} \bar{f}_{ex}(t) = & (0.761855 - 1.52122 \cdot j) \cdot \exp[(-0.381805 - 0.135624 \cdot j) \cdot t] \cdot \\ & + (0.761855 + 1.52122 \cdot j) \cdot \exp[(-0.381805 + 0.135624 \cdot j) \cdot t] \cdot \\ & - (0.753137 - 1.12878 \cdot j) \cdot \exp[(-0.160759 - 0.281611 \cdot j) \cdot t] \cdot \\ & - (0.753137 + 1.12878 \cdot j) \cdot \exp[(-0.160759 + 0.281611 \cdot j) \cdot t] \cdot \\ & - 0.0174342 \cdot \exp(-t) . \end{aligned} \quad (3.25)$$

Графічне зображення рішень (3.23) та (3.25) наведено на рис. 3.4.

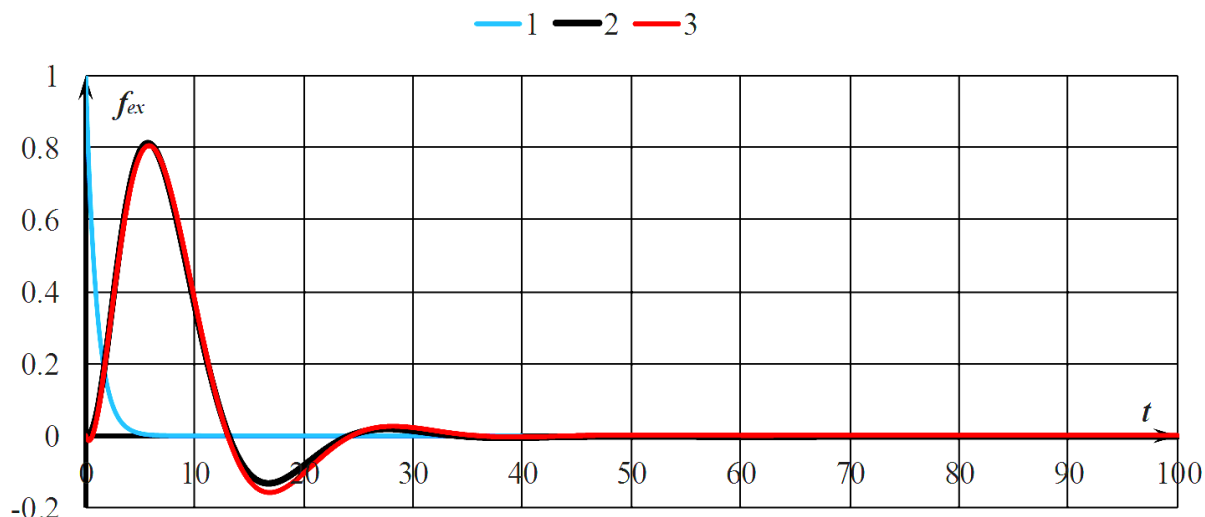


Рисунок 3.4 – Відображення реакції змодельованого об'єкта управління на вплив виду (3.11): 1 – зовнішній вплив; 2 – аналітична модель (3.23); 3 – апроксимуюча модель (3.24)

Порівняння результатів розрахунків показує адекватне відображення за допомогою апроксимуючої моделі реакції системи при імітації імпульсного впливу. Похибка не перевищує 3,6 % відносно максимального значення перехідної характеристики. Відхилення, як і у разі ступінчастої дії, може бути пояснено похибкою відображення вихідних даних при побудові апроксимуючої моделі (3.19). Хороший збіг результатів розрахунків дозволяє вважати апроксимаційну модель виду (3.19) моделлю об'єкта, а не процесу.

Розроблений метод подання апроксимаційної моделі об'єкта дозволяє формалізувати процес визначення виду структури цієї моделі для забезпечення можливості виконання її параметричної ідентифікації.

Порівнюючи запропонований метод апроксимації з застосовуваними при налаштуванні систем автоматичного регулювання, можна відзначити таке. Інженерні методи, що застосовуються зараз, дозволяють знаходити параметри передавальних функцій для об'єктів, по суті, тільки двох класів. А саме: інерційних не коливальних із запізненням та астатичних із запізненням. Порядок інерційності

зазвичай перший чи другий. Клас коливальних об'єктів під час налаштування промислових регуляторів не розглядається. Тому, стикаючись на промисловому об'єкті з подібними перехідними процесами в системі, наладчик може керуватися лише інтуїцією та особистим досвідом налаштування регуляторів. Розглянутий у статті метод апроксимації дозволяє зробити апроксимацію об'єкта регулювання та за знайденими параметрами моделі розрахувати налаштування регулятора, не застосовуючи при цьому спеціалізованих математичних пакетів, таких, як Matlab.

Наведені на рис. 3.3 графіки дозволяють припустити, що точність апроксимаційної моделі може бути підвищена при зміні способу відображення вихідних даних. Як один з них може бути запропоновано використання ґратчастих функцій. Це визначає напрямок подальших досліджень у розробці методів побудови апроксимаційних моделей

3.3 Метод двовимірної ідентифікації нелінійного об'єкта керування

Метод створення апроксимаційної моделі у вигляді (3.9) або для конкретного випадку у вигляді (3.19) має самостійне значення. Рішення, одержане на основі такої моделі, відповідає експериментальним даним. У той же час, ця модель може бути використана для створення системи керування об'єктом, що досліджується. При цьому відображається зміна величини, що цікавить, залежно тільки від одного аргументу. Найчастіше і, зокрема у цьому випадку, залежно від часу. Але в багатьох випадках зміна в часі аналізованих величин може залежати і від інших параметрів, що змінюються, наприклад конструктивних. Для вирішення подібних завдань модель виду (3.19) може бути основою для дво- та більш мірної функціональної апроксимації, як це запропоновано в [115]. Основою для подібних побудов можуть бути експериментальні дані з різних характеристик енергетичного обладнання. Як приклад можна навести рис. 3.5 та рис. 3.6:

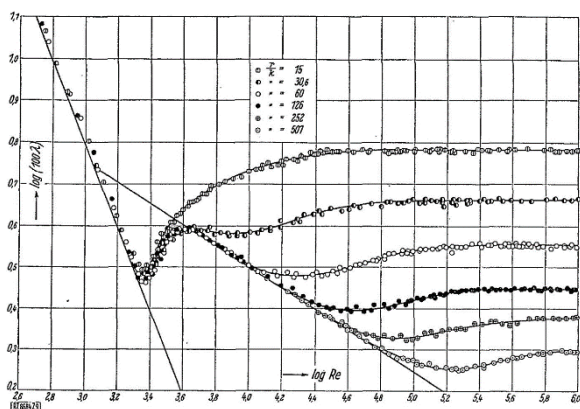


Рисунок 3.5 – Діаграма Нікурадзе для коефіцієнта тертя залежно від числа Рейнольдса та числа шорсткості, r/k : k – абсолютний розмір зерен, що надали шорсткість внутрішньої поверхні труби радіусом, r – радіус труби [116].

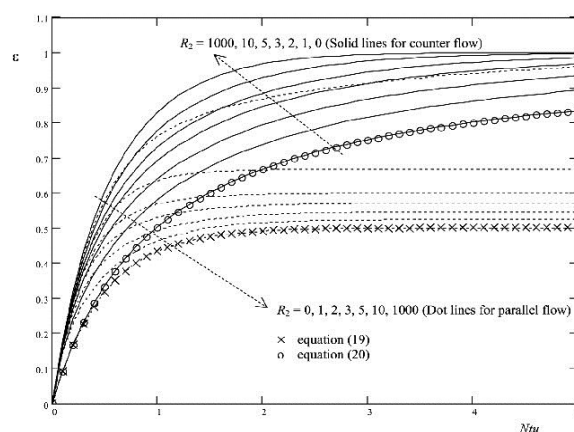


Рисунок 3.6 – Зміна ефективності в залежності від Ntu для різних значень коефіцієнта теплопередачі [117].

Розглянемо як вихідні модельні дані, що імітують експериментальні значення (рис. 3.7), подібні за характером зміни реальних величин (рис. 3.5, 3.6).

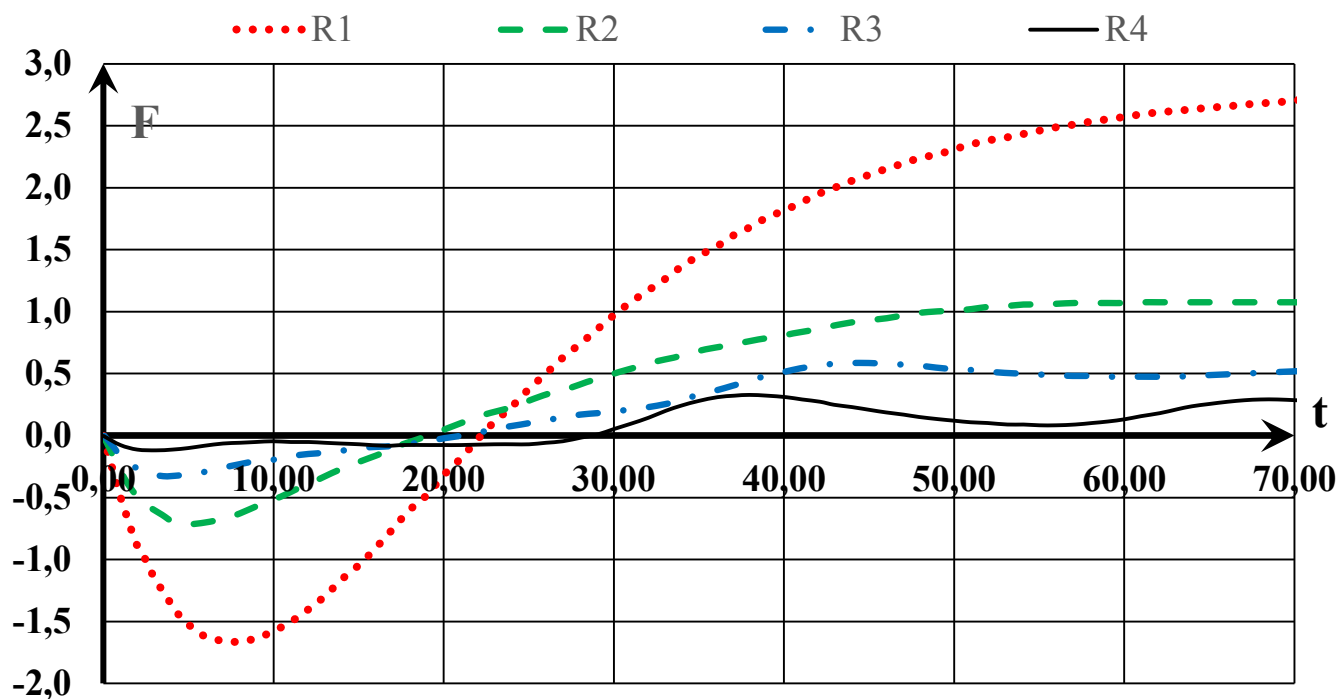


Рисунок 3.7 – Модельні дані процесу $F(t, R)$

У цьому випадку функція F залежить від двох аргументів: часу t і другого аргументу, який назовемо R (рис. 3.7). Відповідно до алгоритму, викладеного в розділі 3.1, для кожного набору даних, відображеного відповідним графіком, отримані передавальні функції подібні до (3.9) виду:

$$\left(\frac{1}{p}\right)^2 \cdot \left[\sum_{i=1}^n c_{ij} i! \left(\frac{1}{p}\right)^{i-1} \right] \Downarrow , \quad (3.26)$$

$$\left(\frac{1}{p}\right)^2 \cdot [L/M] = \left(\frac{1}{p}\right)^2 \cdot \left[\frac{g_L \left(\frac{1}{p}\right)^L + g_{L-1} \left(\frac{1}{p}\right)^{L-1} + \dots + g_0}{h_M \left(\frac{1}{p}\right)^M + h_{M-1} \left(\frac{1}{p}\right)^{M-1} + \dots + 1} \right]$$

або після перетворень:

$$\left(\frac{1}{p}\right)^2 \cdot [L/M] = \left[\frac{\left(\frac{g_L}{h_M}\right) \cdot p^{M-L} + \left(\frac{g_{L-1}}{h_M}\right) \cdot p^{M-L+1} + \dots + \left(\frac{g_0}{h_M}\right) \cdot p^M}{1 + \left(\frac{h_{M-1}}{h_M}\right) \cdot p + \dots + \left(\frac{h_1}{h_M}\right) \cdot p^{M-1} + \left(\frac{1}{h_M}\right) \cdot p^M} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{\Delta R_j} \right] \cdot \frac{\Delta R_j}{p} . \quad (3.27)$$

Вираз (3.27) є чисельним рішенням, записаним з використанням методу апроксимації Паде в просторі зображень. У контексті теорії автоматичного управління воно може бути зрозуміле як опис поведінки системи при ступінчастому впливі у вигляді $\Delta R_j/p$ (другий множник). Таким чином, вираз у квадратних дужках може бути розглянутий як передавальна функція апроксимаційної моделі даної системи.

Далі відбувається апроксимація двовимірних даних. У цьому процесі одним із аргументів є час. Час враховується під час побудови кожної кривої, представленої на

рис. 3.7 як (3.27). Другим аргументом є зміна ΔR . Застосовується метод апроксимації на основі статечного ряду з використанням методу найменших квадратів. Значення функції не є фіксованою кількістю, а відповідає виду функції, представленого як (3.27).

Є чотири величини зміни аргументу R (позначимо як $j=1 \dots 4$). Вважатимемо, що з $R=0$ значення функції $F(t,0)=0$. Таким чином з'являється ще одна точка для розрахунків (додатково до чотирьох наявних за кількістю графіків). В результаті вихідні дані по другій координаті ΔR можуть апроксимуватися поруч четвертого ступеня (без вільного члена). Відповідне матричне рівняння має вигляд:

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{K} \qquad \qquad \qquad \mathbf{X} \\
 \left[\begin{array}{cccc}
 \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^8 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^7 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^6 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^5 \\
 \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^7 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^6 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^5 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^4 \\
 \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^6 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^5 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^4 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^3 \\
 \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^5 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^4 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^3 & \sum_{j=1}^4 (\Delta R_j)^2
 \end{array} \right] \times \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \\
 \mathbf{M} \qquad \qquad \qquad \mathbf{F} \\
 = \left[\begin{array}{cccc}
 (\Delta R_1)^4 & (\Delta R_2)^4 & (\Delta R_3)^4 & (\Delta R_4)^4 \\
 (\Delta R_1)^3 & (\Delta R_2)^3 & (\Delta R_3)^3 & (\Delta R_4)^3 \\
 (\Delta R_1)^2 & (\Delta R_2)^2 & (\Delta R_3)^2 & (\Delta R_4)^2 \\
 (\Delta R_1)^1 & (\Delta R_2)^1 & (\Delta R_3)^1 & (\Delta R_4)^1
 \end{array} \right] \times \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \\ f_4(t) \end{bmatrix} \qquad (3.28)
 \end{array}$$

та рішення:

$$\mathbf{X} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = [\mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{M}] \cdot \mathbf{F}. \qquad (3.29)$$

Тут $f_i(t)$ – функції виду (3.27), що апроксимують кожну з кривих (рис. 3.7); a , b , c , d – коефіцієнти статечного ряду, що описує весь комплекс вихідних даних (рис. 3.7).

Ряд (3.29) з функціями $f_i(t)$ у вигляді (3.27), що відображає двовимірні вихідні дані, можна вважати їх апроксимаційною моделлю.

Для реалізації методу побудови лінійної диференціальної апроксимаційної моделі необхідно виконати послідовність кроків, яка схематично зображена на рис. 3.8.

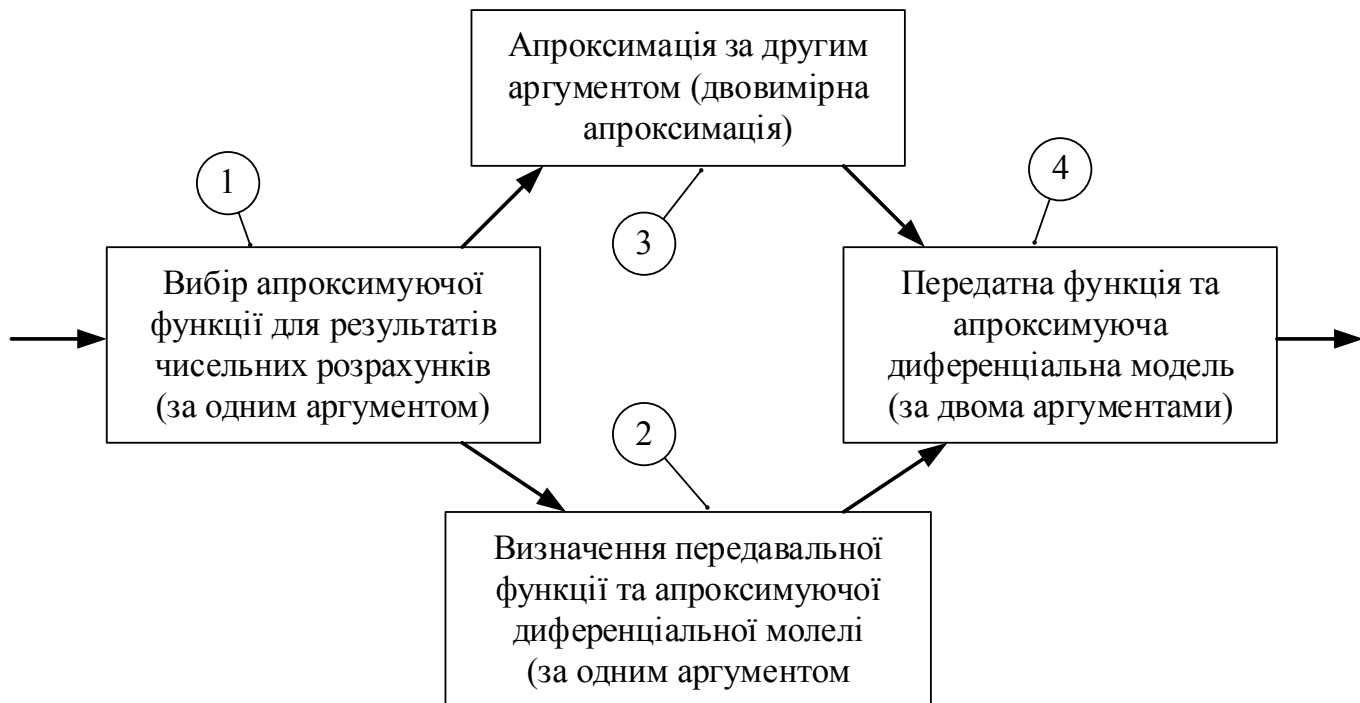


Рисунок 3.8 – Послідовність етапів побудови апроксимаційної моделі

Розроблена модель апроксимації об'єкта управління має лінійний характер, що означає неможливість точного представлення системи по всьому часовому інтервалі. Тим не менш, такий підхід має низку переваг. Він дає можливість використання регуляторів САУ у певний період. Протягом цього періоду можна розрахувати нові параметри моделі апроксимації об'єкта управління, не змінюючи її структуру, а потім переналаштувати регулятори. Це відкриває можливість для динамічної оптимізації

роботи системи управління відповідно до умов, що змінюються, без необхідності повної переробки моделі.

Відповідно до першого кроку (рис. 3.8), отримані апроксимаційні поліноми для графіків рис. 3.7 у формі (3.27). Ступінь полінома вибирається таким чином, щоб забезпечити інженерну точність (відносна похибка менше 5%). Найбільш високий ступінь, 10-а, була потрібна для апроксимації графіка 4, при цьому відносна похибка апроксимації склала не більше 3.6%. Задля більшої однаковості розрахунків й інші графіки були також апроксимовані поліномами тієї самої ступені. Коефіцієнти поліномів у формі (3.3), що відповідають кожному графіку, представлені у табл. 3.1. При апроксимації значення аргументу зменшується на два порядки порівняно з реальним часом.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти апроксимаційних поліномів

Коефіцієнти поліномів	№ графіка (рис. 3.7)			
	1	2	3	4
C_{10}	7.61E+03	-9.52E+03	-4.28E+06	-1.68E+05
C_9	-2.96E+04	5.91E+03	1.07E+07	6.27E+05
C_8	5.12E+04	4.94E+04	-1.11E+07	-9.76E+05
C_7	-5.32E+04	-1.12E+05	6.23E+06	8.18E+05
C_6	3.83E+04	1.12E+05	-2.00E+06	-3.95E+05
C_5	-2.09E+04	-6.35E+04	3.56E+05	1.08E+05
C_4	8.93E+03	2.22E+04	-2.62E+04	-1.46E+04
C_3	-2.86E+03	-4.78E+03	-1.35E+03	4.68E+02
C_2	5.97E+02	6.06E+02	3.71E+02	8.13E+01
C_1	-5.41E+01	-3.49E+01	-1.99E+01	1.10E+01

На третьому етапі процедури (рис. 3.8) було отримано коефіцієнти (3.29) для апроксимації залежності. Ця залежність дозволяє визначити значення функції F (рис. 3.7) у будь-який момент часу у всьому діапазоні зміни аргументу R . У результаті коефіцієнти a , b , c , d мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = -0.5267 \cdot f_4 + 0.7901 \cdot f_3 - 0.5267 \cdot f_2 + 0.1317 \cdot f_1, \\ b = +3.5556 \cdot f_4 - 4.7407 \cdot f_3 + 2.7654 \cdot f_2 - 0.5930 \cdot f_1, \\ c = -7.7037 \cdot f_4 + 8.4444 \cdot f_3 - 4.1481 \cdot f_2 + 0.8148 \cdot f_1, \\ d = +5.3333 \cdot f_4 - 4.0000 \cdot f_3 + 1.7778 \cdot f_2 - 0.3330 \cdot f_1. \end{array} \right. \quad (3.30)$$

Для третього кроку процедури (рис. 3.8) отримано зображення результатів рішення вихідної моделі, представленої малюнку 3.7, у вигляді апроксимації Паде. У цьому процесі як вихідний зрізаний ряд використаний (3.3), з коефіцієнтами, наведеними в табл. 3.1. Апроксимаційні вирази представлені у вигляді раціональних дробів, що мають форму, аналогічну тому, що описана в (3.6):

$$L\left\{\sum_{i=1}^n c_{ij} t^i\right\} = \left(\frac{1}{p}\right)^2 \cdot \frac{b_4 p + b_3 p^2 + b_2 p^3 + b_1 p^4 + b_0 p^5}{a_5 + a_4 p + a_3 p^2 + a_2 p^3 + a_1 p^4 + p^5}. \quad (3.31)$$

У табл. 3.2 наведено коефіцієнти b_i , a_i , відповідні рівняння (3.31), і навіть коріння відповідних рішень.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти апроксимації Паде та коріння її знаменника

№ коэф.	графік 1		графік 2		графік 3		графік 4	
	a_i	b_i	a_i	b_i	a_i	b_i	a_i	b_i
5	1.61E+5	–	9.91E+5	–	1.41E+7	–	2.08E+6	–
4	6.72E+4	5.18E+5	2.18E+5	7.06E+5	1.56E+6	1.21E+6	3.29E+5	6.95E+5
3	9.94E+3	–4.4E+4	2.29E+4	–1.1E+5	9.10E+4	–5.9E+5	2.79E+4	–1.2E+5
2	7.70E+0	–1.4E+4	1.45E+3	–1.1E+4	3.38E+3	–1.6E+4	1.54E+3	2.11E+3
1	3.73E+1	–8.2E+2	5.60E+1	–7.4E+2	8.04E+1	–8.6E+2	5.44E+1	–1.8E+2
0	–	–5.4E+1	–	–3.5E+1	–	–2.0E+1	–	–6.2E+0
Корні								
p_1	–4.770		–18.144		–28.140		–18.983	
p_2	–11.158–3.007i		–13.306–6.878i		–20.076–17.042i		–14.161–11.871i	
p_3	–11.158+3.007i		–13.306+6.878i		–20.076+17.042i		–14.161+11.871i	
p_4	–5.110–15.059i		–5.631–14.548i		–6.068–26.205i		–3.565–17.566i	
p_5	–5.110+15.059i		–5.631+14.548i		–6.068+26.205i		–3.565+17.566i	

Для оцінки адекватності апроксимації зображення рішення у формі (3.31) знайдено оригінали від цих виразів і порівняно для деяких функцій з рішеннями рис. 3.7.

для графіка 1, рис. 3.7:

$$\begin{aligned} f_1(t) = & (2.70904 - 5.63636i) \cdot e^{(-11.158 - 3.00707i)t} + \\ & + (2.70904 + 5.63636i) \cdot e^{(-11.158 + 3.00707i)t} + \\ & + (0.00171661 - 0.0309462i) \cdot e^{(-5.11004 - 15.0588i)t} + \\ & + (0.00171661 + 0.0309462i) \cdot e^{(-5.11004 + 15.0588i)t} - \\ & - 8.63531 \cdot e^{-4.77013t} + 3.21379, \end{aligned} \quad (3.32)$$

для графіка 4, рис. 3.7:

$$\begin{aligned} f_4(t) = & (1.00256 - 1.54385i) \cdot e^{(-14.1613 - 11.8714i)t} + \\ & + (1.00256 + 1.54385i) \cdot e^{(-14.1613 + 11.8714i)t} + \\ & + (0.0450934 + 0.371363i) \cdot e^{(-3.56517 - 17.5659i)t} + \\ & + (0.0450934 - 0.371363i) \cdot e^{(-3.56517 + 17.5659i)t} - \\ & - 2.42919 \cdot e^{-18.9827t} + 0.333883, \end{aligned} \quad (3.33)$$

Порівняння результатів розрахунків за (3.32) та (3.33) з відповідними вихідними даними з рис. 3.7 наведено на графіку рис. 3.9.

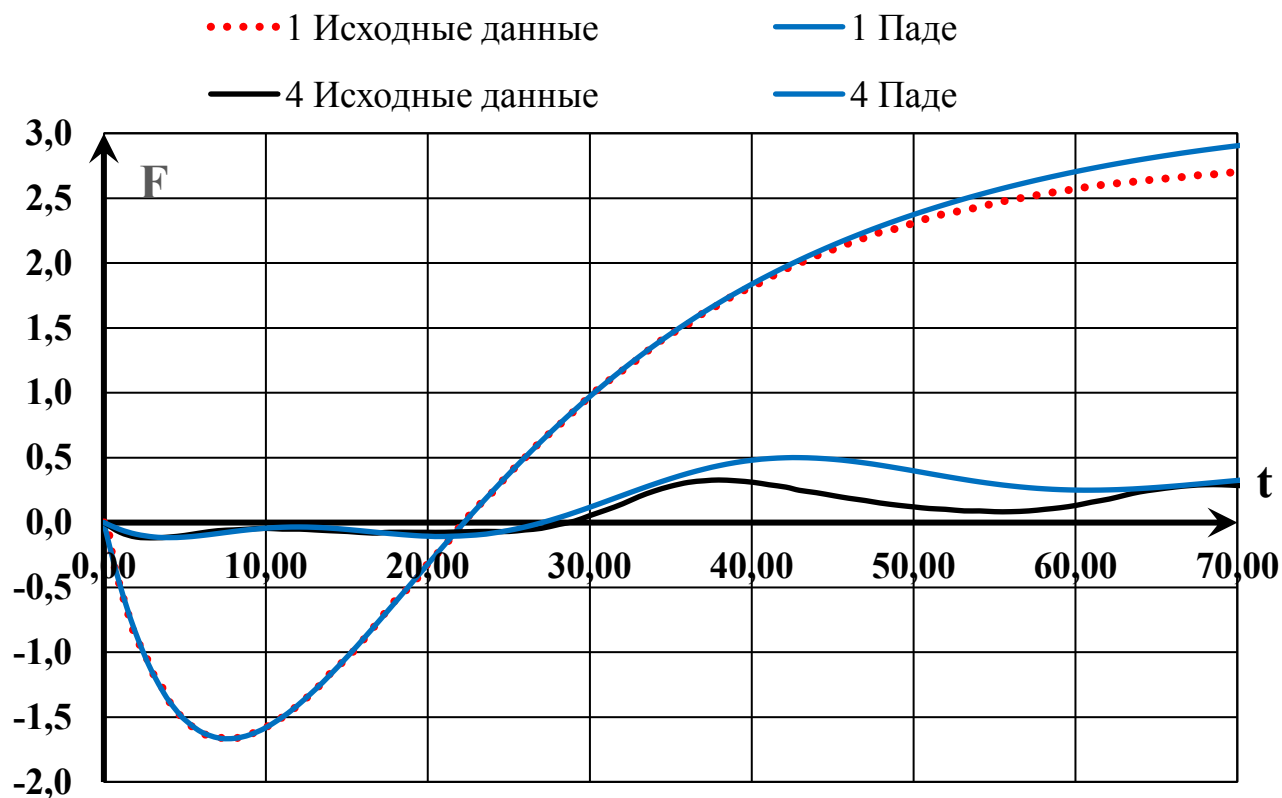


Рисунок 3.9 – Порівняння подання рішення за допомогою апроксимаційного полінома та апроксимації Паде

На рис. 3.9 представлені результати порівняння крайніх випадків наведених вихідних даних. З наведених результатів випливає, що до певного моменту часу (в даному випадку до $t \sim 30$) подання результатів рішення за допомогою апроксимації поліномом і побудованої на його основі апроксимації Паде практично не помітні.

3.4 Висновки до розділу

Отримано за допомогою перетворення Лапласа на основі апроксимації у вигляді степеневого ряду експериментальної характеристики розгону, її вираз у просторі зображень у вигляді скороченого ряду. Результатом відображення цього ряду у вигляді апроксимації Паде є раціональний дріб - аналог передавальної функції деякої лінійної моделі. У просторі оригіналів її можна відобразити у вигляді кількох лінійних диференціальних рівнянь, які є апроксимаційною моделлю

розглянутого об'єкта керування.

Показано можливість побудови двовимірної апроксимаційної моделі на основі отриманої одновимірної моделі. За другим аргументом апроксимація проводиться за допомогою усіченого ряду (полінома) методом найменших квадратів (МНК). На місці значень функцій використовуються отримані одновимірні моделі. Кількість одновимірних моделей визначається кількістю експериментальних кривих.

Уперше застосування розглянутого методу під час налаштування автоматичних регуляторів дає змогу апроксимувати об'єкти керування з не монотонною кривою розгону. До теперішнього часу такий підхід не розглядався в практичних інженерних розрахунках. Для зазначених об'єктів керування налаштування регуляторів здійснюється емпіричними методами, що не гарантує заданої якості перехідного процесу.

РОЗДІЛ 4

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ ТЕРМОДЕСТРУКЦІЇ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ

4.1 Управління трмодеструкцією

Установка трмодеструкції безперервної дії є ефективним рішенням для переробки органічних речовин зі змінним складом в реальних умовах. Зазвичай, коли є обробка таких матеріалів, їх точний склад заздалегідь невідомий. Понад те, з часом цей склад може змінюватися, що створює додаткові труднощі під час виборів відповідного методу переробки. Принципова схема піролізної установки, представлена на рис. 4.1, забезпечує можливість ефективної роботи з різними типами сировини.

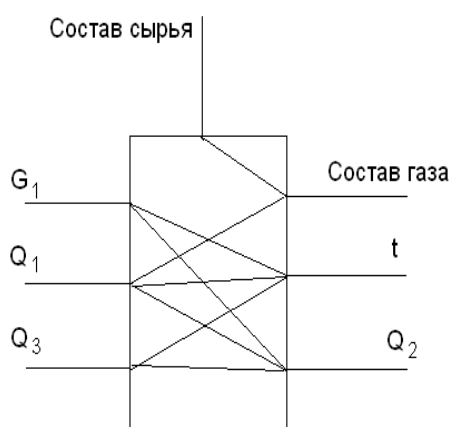


Рисунок 4.1 – Принципова
схема піролізної установки

Будова основної частини установки, саме реактора III, відповідає схемі наведеної рис. 2.3. Принцип його роботи та величини деяких параметрів для стаціонарного режиму роботи відповідають описаним раніше. Процес починається з надходження вихідної сировини через колектор I із витратою G_{in} . Ця сировина подається на вхід реактора. На виході з реактора через колектор II надходить гарячий продукт-газ. Його витрата становить Q_2 , і він спрямовується в загальну систему. Тут газ

поділяється на два потоки. Перший потік з витратою Q_4 надходить до споживача, а другий потік з витратою Q_3 по лінії рециркуляції направляється назад в реактор. Цей потік використовується для сушіння та нагрівання вихідної сировини, що подається на вхід V. Через колектор IV систему подається необхідна кількість повітря з витратою Q_1 , забезпечуючи необхідні умови для роботи реактора.

Ця установка дозволяє:

– На стаціонарній стадії роботи вона здатна повністю газифікувати органічну складову речовини, що переробляється. Це досягається шляхом розрахунку та регулювання подачі мінімально необхідної кількості повітря, виходячи з відомого складу та ентальпії речовини. Крім того, для забезпечення сверхадіабатичного режиму процесу подача частини гарячого продукт-газу (II) з виходу піролізної установки на її вхід (V) також розраховується і регулюється.

– У процесі роботи установка здатна відстежувати склад вихідної речовини за допомогою спеціального пристрою (VII), описаного у патенті [109]. Коли цей склад змінюється, система автоматично перетворюється на режим визначення нового складу.

– На перехідних режимах, включаючи момент запуску установки та зміни складу вихідної сировини, пристрій також може визначати поточний склад речовини та її ентальпію за допомогою пристрою (VII).

Таким чином, ця установка забезпечує ефективну та автоматизовану роботу, забезпечуючи оптимальні умови газифікації та контролюючи склад та енергетичні характеристики речовини, що переробляється в різних умовах роботи.

При стаціонарному режимі роботи та повній газифікації органічної складової вихідної сировини брутто-формула продукт-газу відповідає брутто-формулі вихідної сировини. Це означає, що склад газу, отриманого внаслідок газифікації, відповідає складу вихідної сировини, як зазначено у табл. 2.11. Щоб контролювати склад продукту-газу та його сталість, використовується пристрій (VII). Робота цього пристрою заснована на методі, описаному в джерелі [118], який полягає в визначенні брутто-формули суміші горючих газів в процесі їх спалювання в спеціальному пристрої [111]. Для цього необхідно виміряти витрати газової суміші, повітря та температури продуктів згоряння у пристрої при різних витратах суміші. Важливо зазначити, що склад газової суміші може містити не горючі гази.

У випадку зміни складу продукту-газу установка автоматично переходить з режиму газифікації в режим горіння. Це досягається збільшенням подачі повітря через колектор (IV), щоб забезпечити перетворення вихідної сировини зі зміненим

складом газоподібних продуктів. Потім у пристрої (VII) (рис. 4.1) визначається їхня брутто-формула і, отже, новий склад вихідної сировини. На основі цих даних установка переводиться в режим піролізу (газифікації) шляхом регулювання подачі повітря відповідно до нового складу сировини.

4.2 Синтез системи керування установкою отримання продукт-газу

Для управління та оптимізації роботи піролізної установки розроблено імітаційну математичну модель, яка описує її динамічні властивості через кілька каналів. Перший канал пов'язує витрати повітря Q_1 з витратою продукт-газу Q_2 для контролю окисної реакції у процесі піролізу-газифікації. Другий канал пов'язує витрати вихідної сировини G_{in} з витратою продукт-газу Q_2 , що дозволяє регулювати процес розкладання сировини. Третій канал визначає вплив витрати рециркуляційного газу Q_3 на витрату продукт-газу Q_2 підтримки певного рівня реакції в системі. Наступні три канали пов'язують витрати повітря Q_1 , витрату вихідної сировини G_{in} і витрату рециркуляційного газу Q_3 з температурою піролізу.

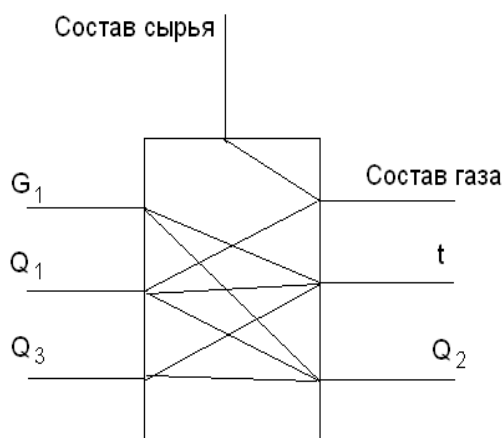


Рисунок 4.2 – Параметрична схема регульованого апарату

Це дозволяє контролювати та регулювати температуру процесу t для забезпечення оптимальних умов розкладання сировини та отримання необхідних продуктів. Останні два канали пов'язують витрату повітря Q_1 і витрату вихідної сировини G_{in} зі складом продукт-газу. Параметрична схема наведена рис. 4.2.

Піролізна установка та топка з киплячим шаром мають схожу конструкцію. У роботах [119–122] представлені математичні моделі

киплячого шару, орієнтовані на регулювання температури та складу газоповітряної суміші на виході. Зазвичай динамічні характеристики таких систем визначаються з урахуванням рівнянь збереження і енергії.

Для піролізної установки можна записати:

$$\frac{dT_L}{dt} S_L \rho_L c_L H_L = G_\theta Q_{i\theta}^\delta + Q_1 h_1 + Q_3 Q_i^\delta - Q_2 Q_i^\delta - I_{ash} - I_R \quad (4.1)$$

де T_L – температури шару та газу;

S_L – площа дзеркала реакції;

ρ_L, ρ_g – насипні щільності шару та газу;

C_L, C_g – теплоємність матеріалу шару та газу;

H_L – висота шару;

G_{ui} – витрата сировини (шихти)

Q_1, Q_2, Q_3 , – витрата повітря, продукт-газу, рециркуляційного газу;

Q_{ui}^p – теплотворна здатність сировини;

Q_h^p – теплотворна здатність синтезу газу та рециркуляційного газу;

I_{ash}, I_R – втрати теплоти з золою і випромінюванням.

Після того, як складові рівняння (4.1) представлені у вигляді прирощень, рівняння набуває наступного вигляду:

$$\frac{dT_L}{dt} S_L \rho_L c_L H_L = \Delta G_\theta \bar{Q}_i^\delta + \bar{G}_\theta \Delta Q_i^\delta + \Delta Q_1 \bar{c}_1 T_1 + \Delta Q_3 \bar{c}_L T_L + \bar{Q}_3 \bar{c}_L \Delta T_L - \Delta Q_2 \bar{c}_L T - \bar{Q}_2 \bar{c}_L \Delta T_L \quad (4.2)$$

або

$$\begin{aligned} & \frac{S_L \rho_L H_L}{\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3} \frac{dT_L}{dt} + \Delta T_L = \\ & = \frac{\bar{c}_u (T_L - \bar{T}_u)}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta G_{ui} + \frac{\bar{G}_1}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_h^p + \frac{\bar{c}_1 (T_L - \bar{T}_1)}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_1 + \\ & + \frac{\bar{T}_L}{(\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_3 - \frac{\bar{T}_L}{(\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Рециркуляційний газ – це частина продуктового газу, яка прямує назад до установки. Він має однакову теплотворну здатність і залежить від температури процесу піролізу. Саме тому регульований апарат, що контролює потоки через канали " $Q_3 - T_L$ ", " $Q_2 - T_L$ ", " $Q_1 - T_L$ " і " $G_{ш} - T_L$ " можна розглядати як інерційну ланку першого порядку із запізненням. Це запізнювання визначається довжиною трубопроводів, через які відбувається подача та відведення газу.

Із закону збереження маси випливає:

$$\frac{dm}{dt} = G_{ш} + Q_1 + Q_3 - Q_2, \quad (4.4)$$

З (4.4) і з урахуванням рівнянь хімічної кінетики досліджуваного процесу слід розглядати регульований апарат каналами « $Q_1 - Q_2$ », « $G_1 - Q_2$ » « $Q_3 - Q_2$ » як інерційна ланка. Інерційність визначається швидкістю поширення фронту термодеструкції вихідної сировини.

Зв'язки між вхідними та вихідними параметрами передавальних функцій представлені в табл. 4.1. Коефіцієнти було визначено з розрахунку процесу піролізу.

Оскільки формула для розрахунку бруutto продукту-газу збігається з формулою вихідної сировини і залежить від кількості повітря, що подається, склад газу визначається складом сировини та об'ємом повітря. Для оцінки складу газу вибрано параметр його теплотворної здатності. Теплотворна здатність газу залежить від співвідношення між витратами сировини та повітря. Це означає, що з певному співвідношенні цих витрат теплотворна здатність газу змінюється нелінійно [123–124].

В результаті такого регульованого процесу, де управління здійснюється по каналах "витрата повітря - склад газу" і "витрата сировини - склад газу", нелінійні властивості істотно впливають на кінцевий склад газу та його теплотворну здатність. Грунтуючись на результатах досліджень була прийнята квадратична залежність

Таблиця 4.1 – Зв'язки між вхідними та вихідними параметрами передавальних функцій

	витрата повітря Q_1 моль/с	витрата сировини G_1 моль/с	витрата рециркуляційного газу Q_3 моль/с	теплотворна здатність сировини Q_H^P
витрата продукт-газу Q_2 , моль/с	$W(s) = \frac{1}{T_1s + 1}$	$W(s) = \frac{1}{T_1s + 1}$	$W(s) = \frac{1.83}{T_1s + 1}$	—
температура піролізу T_L , К	$W(s) = \frac{600}{T_2s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{300}{T_2s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{300}{T_2s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{200}{T_2s + 1} e^{-\tau s}$
Теплотворна здатність продукт-газу Q_i^o	$W(s) = \frac{k \left(\frac{Q_2}{G_1} \right)}{T_1s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{k \left(\frac{Q_2}{G_1} \right)}{T_1s + 1} e^{-\tau s}$	—	$W(s) = \frac{1}{T_1s + 1} e^{-\tau s}$

теплотворної здатності продукт-газу від співвідношення витрат сировини та повітря:

$$Q_H^P = Q_{H0}^P \left(1 - k(Q_1 - G_u V_0)^2 \right), \quad (4.5)$$

де Q_H^P – теплотворна здатність продукт-газу; Q_{H0}^P – максимально можлива теплотворна здатність, що залежить від складу вихідної сировини, на даному етапі прийнято $Q_{H0}^P = 1$; V_0 – об'єм повітря необхідний для піролізу 1 моль вихідної сировини. Залежить від складу сировини; k - коефіцієнт пропорційності, який визначається розрахунковим або експериментальним шляхом для конкретного складу сировини. На цьому етапі прийнято $k = 0.2$.

Дослідження показали, що енергетична ефективність процесу піролізу безпосередньо залежить від двох ключових параметрів: витрати сировини та її теплотворної здатності. Чим вище витрата сировини і чим більша його теплотворна здатність, тим більше енергії виділяється внаслідок окислення. Математична модель

цієї залежності може бути описана з використанням відповідних рівнянь, які враховують вплив зазначених параметрів на процес піролізу:

$$Q = \bar{Q}_i^p \cdot \Delta G_1 + \bar{G}_1 \cdot \Delta Q_i^p + \Delta Q_i^p \cdot \Delta G_1. \quad (4.6)$$

Структурна схема розглядуваного об'єкта наведена на рис. 4.3.

Експериментальні дослідження показали, що постійні часу та величини запізнення у процесі управління залежать від геометричних параметрів самого пристрою та мають бути налаштовані індивідуально для кожної конкретної установки. На поточному етапі досліджень було прийнято значення постійних часу, що відповідають експериментальним даним, отриманим у попередніх роботах: $T_1=400$ с, $T_2=500$ с, а також параметр запізнення $\tau=10$ с.

У процесі моделювання об'єкта управління було виявлено, що через канал " $Q_3 - Q_2$ " можуть виникати режими роботи, при яких установка переходить із стійкого стану в нестійкий через наявність позитивного зворотного зв'язку. Поведінка об'єкта управління через цей канал визначається співвідношенням між витратами вихідної сировини (G_{in}) та витратою рециркуляційного газу (Q_3).

Після завершення процесу піролізу при виробництві продукт-газу вводиться в експлуатацію "мокрий газгольдер", позначений на схемі VI (рис. 4.1). Цей компонент системи забезпечує додаткову буферну ємність для усунення різких коливань у витраті продукту-газу, що виникають при його постійному споживанні. Крім того, регулювання рівня газу в газгольдері може бути використане як додатковий параметр контролю, що відображає різницю між кількістю газу, споживаним процесом, і його об'ємом, що виробляється.

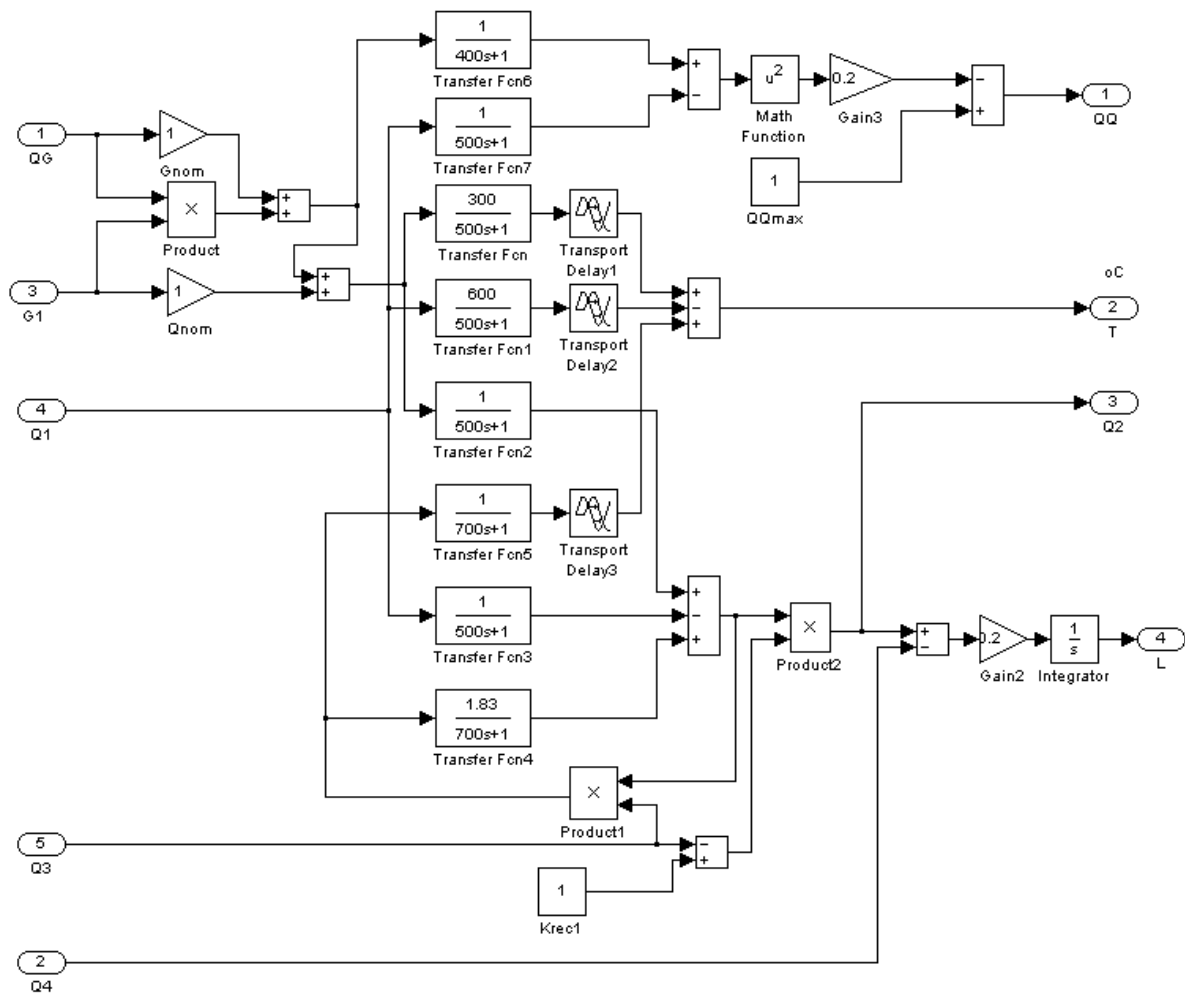


Рисунок 4.3 – Структурна схема імітаційної моделі регульованого апарата

Перевагою такої конструкції є те, що не потрібний точний вимір витрати газу змінного складу. Натомість використовується механізм управління рівнем у газгольдері для забезпечення стабільності постачання газу при коливаннях його споживання, що підвищує ефективність виробничого процесу.

Таким чином, як **регульовані параметри** виступають:

1. склад продукту газу;
2. витрата продукту газу;
3. температура піролізу (продукт-газу);
4. рівень рідини в газгольдері.

Величини, що надають **керуючі дії**:

1. Витрата рециркуляції продукт-газу;
2. Витрата повітря;
3. Витрата вихідної сировини.

Величини, що надають **зовнішнє обурення на об'єкт**:

1. склад вихідної сировини;
2. заданий витрата продукт-газа.

Схема автоматизованої системи регулювання піролізної установки показано рис. 4.4.

На малюнку застосовані такі позначення:

Subsystem – об'єкт управління, описаний вище;

У системі управління технологічним процесом використовуються такі компоненти:

1. **L_Control** – регулятор рівня рідини у газгольдері;
2. **T2_Control** – регулятор температури піролізу;
3. **Q2_Control** – регулятор витрати продукт-газу;
4. **U1, Y, U** – блоки виведення графіків (Scope). Ці блоки використовуються для візуалізації різних параметрів та сигналів у системі;
5. **QG, Q4** – блоки завдання збурень. Дозволяють вводити в систему зовнішні обурення або зміни, що використовується для тестування стійкості та реакції системи на умови, що змінюються;
6. **Lz, Tz, Q2z** – задатчики регуляторів. Ці блоки встановлюють задані значення регуляторів рівня рідини, температури піролізу і витрати продукт-газу відповідно, забезпечуючи відповідність фактичних параметрів встановленим цілям.

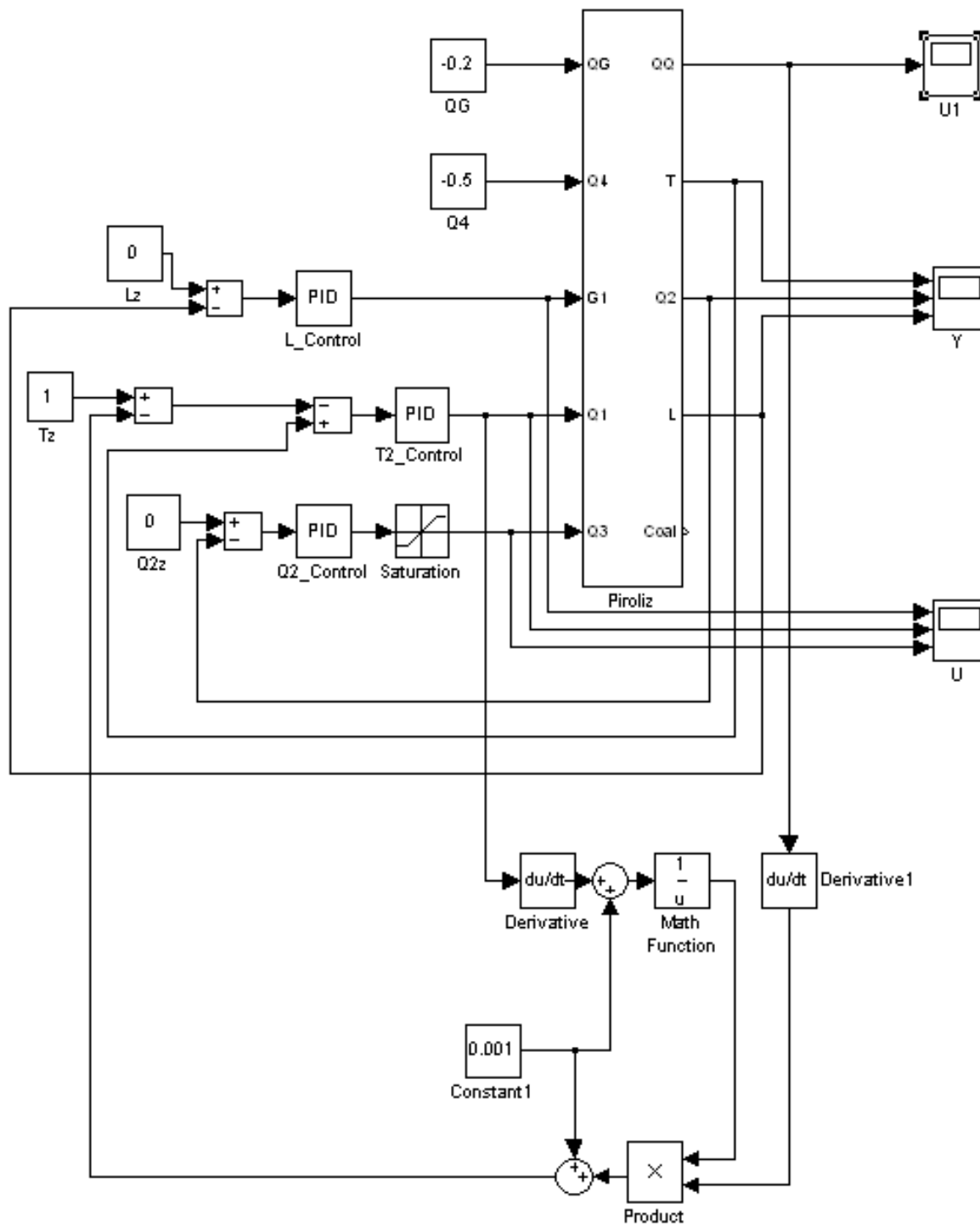


Рисунок 4.4 – Структурна схема імітаційної моделі АСР

Є нижня група, що складається із семи блоків, яка функціонує як підсистема екстремального регулювання. Її завдання – оптимізувати виконання цільової функції $Q_H^p = f(Q_1)$, регулюючи температуру шихти T .

На рисунках (4.5) – (4.8) зображено процеси регулювання при внесенні різних збурень, таких як зміна витрати продукту-газу та зміна складу вихідної сировини. Обурення включають зміну витрати продукт-газу $\Delta Q_2 = \pm 0,5$ в моль/с і відхилення теплотворної здатності вихідної сировини на 20% як у більшу, так і в меншу сторону $\Delta Q_{i\theta}^{\theta} = \pm 0,2$. Ці збурення можуть бути застосовані як окремо, так і в комбінації один з одним. Подані графіки демонструють перехідні процеси регулювання лише за одночасної дії всіх збурень.

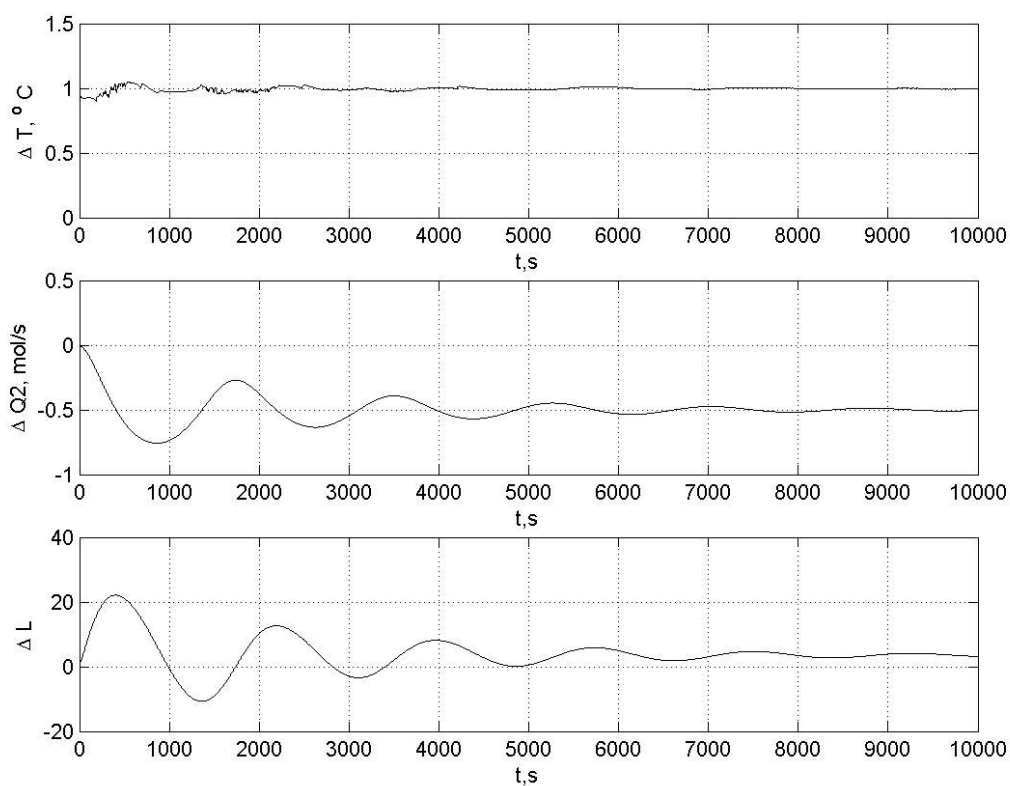


Рисунок 4.5 – Відхилення регульованих величин піролізної установки.

Обурення $\Delta Q_2 = -0,5$ моль/с , $\Delta Q_{H\text{ III}}^p = -20\%$

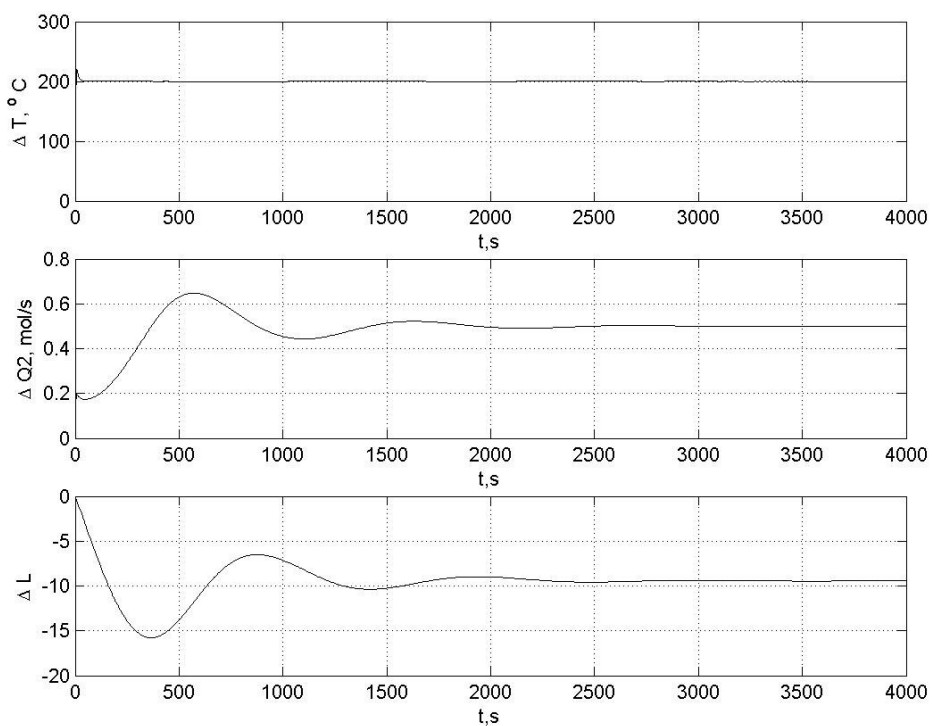


Рисунок 4.6 – Відхилення регульованих величин піролізної установки.

Обурення $\Delta Q_2 = 0,5$ моль/с, $\Delta Q_{H\ III}^p = -20\%$

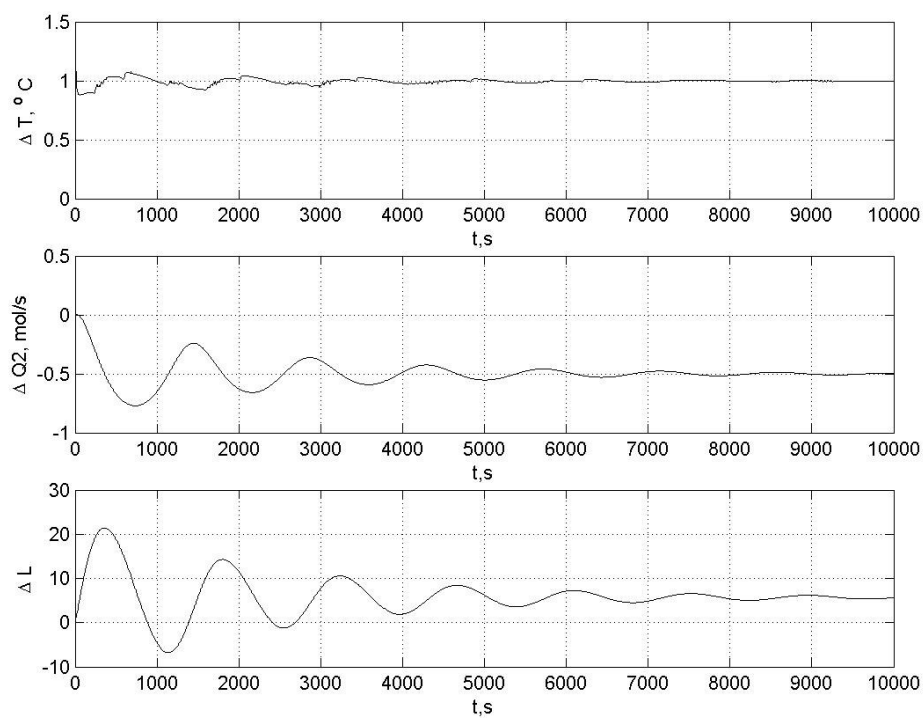


Рисунок 4.7 – Відхилення регульованих величин піролізної установки.

Обурення $\Delta Q_2 = -0,5$ моль/с, $\Delta Q_{H\ III}^p = 20\%$

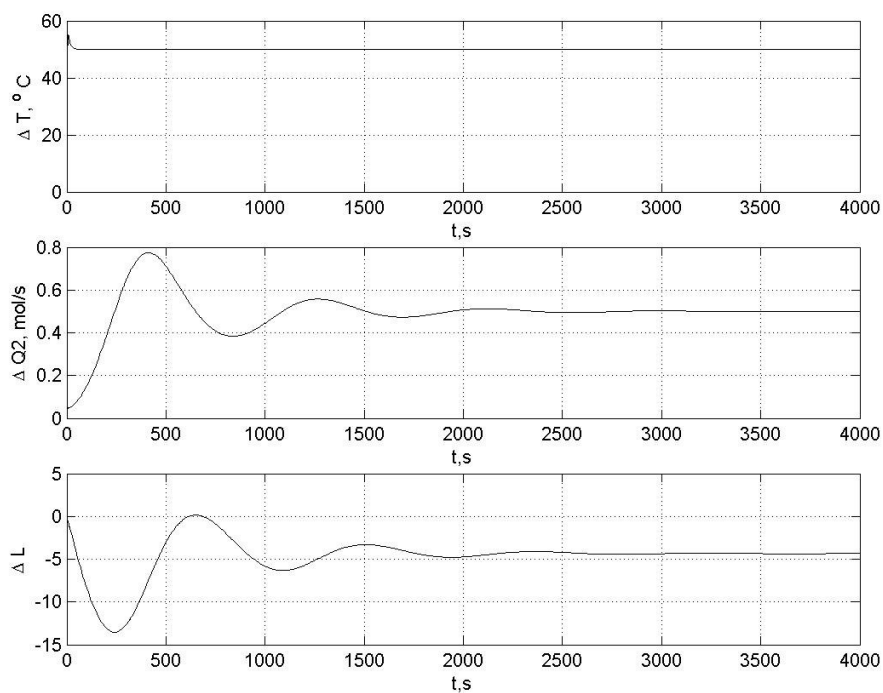


Рисунок 4.8 – Відхилення регульованих величин піролізної установки.

Обурення $\Delta Q_2 = 0,5$ моль/с, $\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = 20\%$

В рамках дослідження цієї системи також було вивчено роботу підсистеми оптимізації. На рисунках (4.9) – (4.12) подано процес пошуку максимуму теплової ефективності продукту газифікації. Обурення, які було зазначено раніше, також залишаються актуальними.

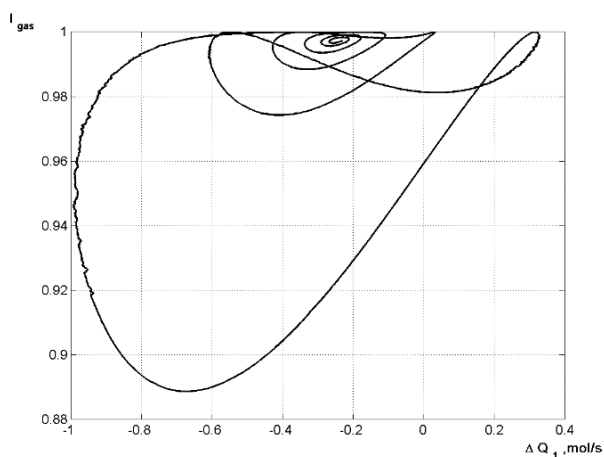


Рисунок 4.9 – $\Delta Q_2 = -0,5$ моль/с,

$\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = -20\%$

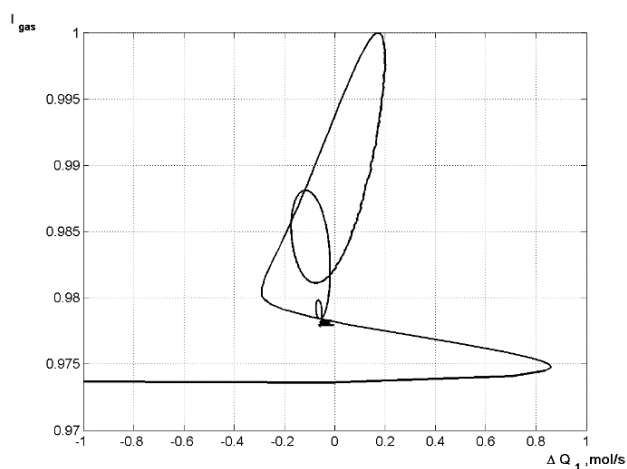
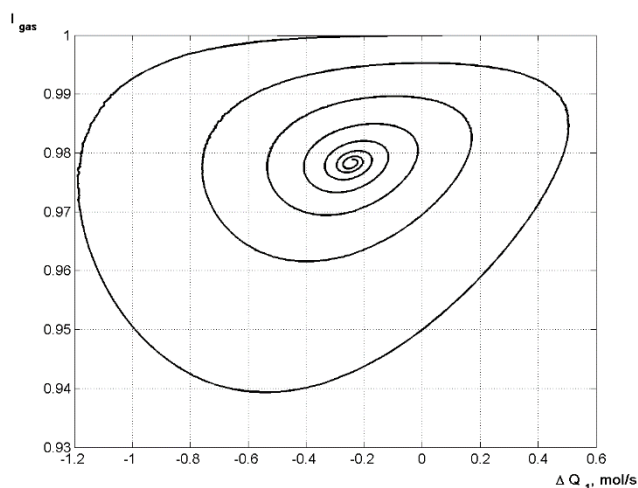
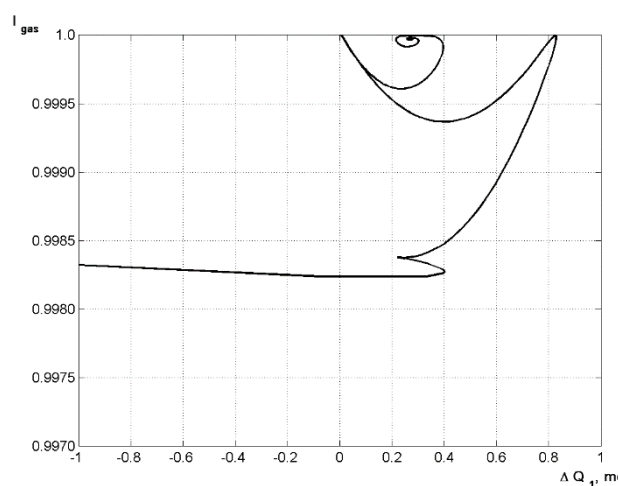


Рисунок 4.10 – $\Delta Q_2 = 0,5$ моль/с,

$\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = -20\%$

Рисунок 4.11 – $\Delta Q_2 = -0,5$ моль/с ,

$$\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = 20\%$$

Рисунок 4.12 – $\Delta Q_2 = 0,5$ моль/с ,

$$\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = 20\%$$

Наведені результати демонструють коректну реакцію системи управління зовнішні обурення. Особливо ефективно її функціонування проявляється при дії обурень, спрямованих у різні боки ($\Delta Q_2 = -0,5$ моль/с , $\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = -20\%$ та $\Delta Q_2 = 0,5$ моль/с , $\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = 20\%$). У разі система досягає максимального рівня тепловиділення продуктів згоряння. При односпрямованих обуреннях ($\Delta Q_2 = 0,5$ моль/с , $\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = -20\%$ та $\Delta Q_2 = -0,5$ моль/с , $\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = 20\%$), теплотворна здатність палива становить близько 98% від максимально можливого значення.

4.3 Приклад реалізації установки термодеструкції органічних речовин довільного складу

4.3.1 Економічні та екологічні причини зростання зацікавленості у процесах та пристроях термодеструкції органічних речовин довільного складу

Посилення інтересу до пристроїв газифікації твердих органічних речовин (газогенераторів) з отриманням на виході суміші горючих газів спричинене поєднанням різних причин. Наприклад:

- у багатьох випадках вихідною сировиною для них слугують різного роду відходи: деревообробної промисловості, відходи сільського господарства, побутові

відходи. Вони мають низьку або, навіть, негативну вартість. У звичайних умовах на їхню утилізацію необхідно витратити певну кількість коштів. Використання відходів як вихідної сировини для газогенераторів впливає на зниження вартості кінцевого продукту - суміші горючих газів. Вони можуть виступати в якості конкурента природному газу в енергетичній галузі та у сфері хімічного синтезу;

– вуглекислий газ і метан належать до парникових газів, якщо вони утворилися під час використання викопного палива. Вуглекислий газ, що утворюється під час використання генераторного газу, до парникових не належить. Таким чином, використання ГГ газу, отриманого з різного виду відходів, відповідає "зеленому" порядку денному розвитку енергетики;

– за допомогою газифікації в широкий енергетичний обіг можуть бути залучені низькокалорійні органічні речовини - торф, горючі сланці тощо.

Різноманіття схем наявних ГГ свідчить про наявність суттєвих недоліків у кожній з них, про відсутність оптимальної конструкції навіть в окремому їхньому класі. На тлі зростаючого інтересу до використання ГГ видається актуальним розроблення схеми комбінованого ГГ, що інтегрує переваги і нівелює недоліки хоча б деяких видів газогенераторів.

4.3.2 Існуючі методи термодеструкції органічних речовин.

Можна виділити дві групи процесів газифікації органічних речовин:

- газифікація в псевдозрідженому або киплячому шарі;
- газифікація в щільному шарі.

Пристрої, що реалізують процеси першої групи [125], мають підвищену потужність, що перевершує на порядок і більше потужність пристроїв другої групи. Але вони мають і низку недоліків. Горючі гази, отримані за такою технологією, містять велику кількість смол, зольних залишків і потребують очищення. Пред'являються підвищені вимоги до підготовки вихідної сировини (однорідний розмір шматків, знижена вологість). Неможливість роботи на знижених потужностях через необхідність забезпечення дуття певного обсягу для створення киплячого шару. Конструкція таких пристроїв, порівняно з газифікацією в щільному шарі,

складна і вимагає обслуговуючого персоналу високої кваліфікації. Існують і логістичні проблеми. Пристрої тепловою потужністю 100 МВт і більше потребують підвезення великої кількості сировини. Важко, затратно зібрати і підвезти, наприклад, сільськогосподарські відходи для забезпечення роботи пристроїв такої потужності.

Пристрої, що реалізують процеси другої групи, мають обмеження за тепловою потужністю 3 - 5 МВт. Цього достатньо для забезпечення роботи багатьох виробничих процесів. При їх використанні знімаються логістичні проблеми. Крім того, пристрої для газифікації в щільному шарі історично з'явилися першими і є найпростішими у влаштуванні та експлуатації. Але й вони мають недоліки. У ГГ термічна конверсія органічних речовин здійснюється в результаті протікання трьох процесів: піролізу, газифікації та горіння. Схеми процесів, що реалізуються в ГГ, які працюють безперервно, різняться відносним напрямком руху вихідної сировини, продуктів реакції та послідовністю виконання процесів термічної конверсії. Одним із таких пристроїв є ГГ прямої дії. Вони прості й надійні в роботі, малочутливі до зміни навантаження, дають змогу використовувати сировину високої вологості (до 60%). Ці властивості зумовлюють спроби використання таких ГГ і нині [126]. Але в таких генераторах є суттєвий недолік, зумовлений зустрічним напрямком руху вихідної сировини (зверху вниз) і продуктів газогенерації (знизу вгору). Вони містять велику кількість смол, що виникають у процесі піролізу вихідної сировини на кінцевих ділянках руху продуктів реакції (у верхній частині ГГ, на початковій ділянці руху вихідної сировини). Внаслідок цього отримані горючі гази не підлягають транспортуванню і можуть використовуватися тільки в топках у безпосередній близькості від місця виробництва або потребують істотних витрат для їх очищення.

Ще одним пристроєм, що реалізує процеси другої групи, є обернений ГГ [127]. У цьому пристрої протікають ті самі процеси, що й у ГГ прямої дії, але в іншому порядку. Початкова сировина так само подається зверху і рухається вниз під дією сили тяжіння. У цьому ж напрямку рухаються і газоподібні продукти реакції. У верхній частині відбувається піроліз з утворенням, зокрема, великої кількості смол.

Далі продукти реакції надходять у зони з високими температурами - горіння і відновлення. У них смоли згорають або розкладаються до простих сполук. У результаті вміст смол у кінцевих продуктах газифікації в десятки і сотні разів менший, ніж після ГГ прямої дії. Для очищення від залишків смол потрібні пристрої мінімального розміру або взагалі можуть бути відсутніми. У результаті діапазон застосування одержуваних горючих газів ширший порівняно з ГГ прямої дії. Але існує і низка недоліків, властивих ГГ цього типу. Так, конструкція їх складніша порівняно з ГГ прямої дії. Більш високі вимоги до якості вихідної сировини. Її вологість не повинна перевищувати 25% порівняно з 60% для ГГ прямої дії. Вони чутливі до зміни навантаження. Їх ККД нижчий, ніж у ГГ прямої дії.

У рамках спроби поєднати переваги ГГ прямої дії та оберненого ГГ було запропоновано ГГ поперечного процесу [127]. Головна його перевага - можливість працювати за малих потужностях. Недоліки - низька ефективність і високий вміст смол у газі. Саме тому такі апарати не набули широкого поширення.

Підсумовуючи всі переваги описаних схем і враховуючи їхні недоліки, у Фінляндії було запропоновано технологію газифікації "ENTIMOS" [128]. Відповідно до неї газифікацію проводять у ГГ прямої дії, але горючі гази відбирають у двох місцях: після області горіння і газифікації (до зони піролізу) з мінімальною кількістю смол і у верхній частині ГГ після області піролізу. Такий підхід дає змогу отримати частину горючих газів із мінімальною кількістю смол, але не дає змоги маневрувати об'ємом горючих газів, використовуваних у різних умовах. Крім того, зміна складу вихідної сировини може змістити межу відбору різних фракцій горючих газів і, відповідно, змінити їхній склад.

Підхід, аналогічний технології "ENTIMOS" реалізується і в разі газифікації в киплячому шарі в рамках технології двоступеневої газифікації. Подібна технологія реалізована, наприклад, у ГГ "SilvaGas" [128]. У [130] описується двоступеневий ГГ у пиловому потоці за технологією фірми "Choren". Не усуваючи всіх недоліків газифікації в киплячому шарі, такий підхід демонструє прагнення розділити в просторі зони піролізу і горіння.

У [131] запропоновано схему комбінованого ГГ. У ньому інтегруються переваги ГГ у щільному шарі прямої дії. Передбачається можливість регулювання продуктивності в широкому діапазоні, використання сировини високої вологості, мінімальні вимоги до фракційної підготовки сировини. Як і в оберненому ГГ реалізується можливість отримання продукт-газу з низьким вмістом смол. Аналогічно технології ГГ "SilvaGas" реалізується технологія двоступеневої газифікації. Організовано поділ у просторі зони піролізу та горіння. Передбачається можливість рекуперації з поверненням у зону реакції енергії продукт-газу у формі тепла. Але описана в [131] технологія представлена тільки у вигляді принципової схеми.

У рамках проведеного аналізу видається перспективним застосування технології, описаної в [131]. Для цього необхідне розроблення методів розрахунку параметрів процесів, що протікають.

4.3.3 Установка термодеструкції органічної сировини

На рис. 4.13 представлено принципову схему запропонованого до розгляду ГГ [18]. Корпус складається з трьох частин, об'єднаних у єдину конструкцію. У частині 1a розташовується зона горіння і газифікації. Частина 1b є зоною піролізу деревних відходів. Частина 1c є зоною газифікації органічної сировини будь-якого складу.

Незважаючи на однакову конструкцію зон 1b і 1c, параметри процесів, що відбуваються, відрізняються. У зоні 1b створюються умови для піролізу деревини за відсутності або мінімального подання повітряного потоку. Метою є отримання максимально можливої кількості деревного вугілля, яке подається до зони 1a і є її робочим продуктом. У зоні 1c створюються умови для максимальної газифікації будь-якої органічної сировини з утворенням мінімально можливої кількості карбонізованих залишків. Шлаки з зони 1c видаляються для захоронення на полігонах або використання при виробництві будівельних матеріалів. Характер процесів, що відбуваються в зонах 1b і 1c, однаковий. Взаємодія частин установки під час роботи описана на прикладі зон 1a і 1b.

Вихідна сировина надходить у зону піролізу з бункера 2 через клапан 3. За допомогою вентилятора (димососа) 4 газоподібні продукти піролізу через теплообмінник 5 надходять у нижню частину 6 зони горіння і газифікації. Окислювач може подаватися в різні ділянки 7, 8 зони горіння і газифікації, а також 9 нижньої частини зони піролізу. Це можливі, а не обов'язкові зони подачі окислювача. Частина утворених газів із верхньої частини 10 зони газифікації надходять у зону піролізу. Інша їх частина надходить у теплообмінник 5 і далі на вихід 11 до споживача.

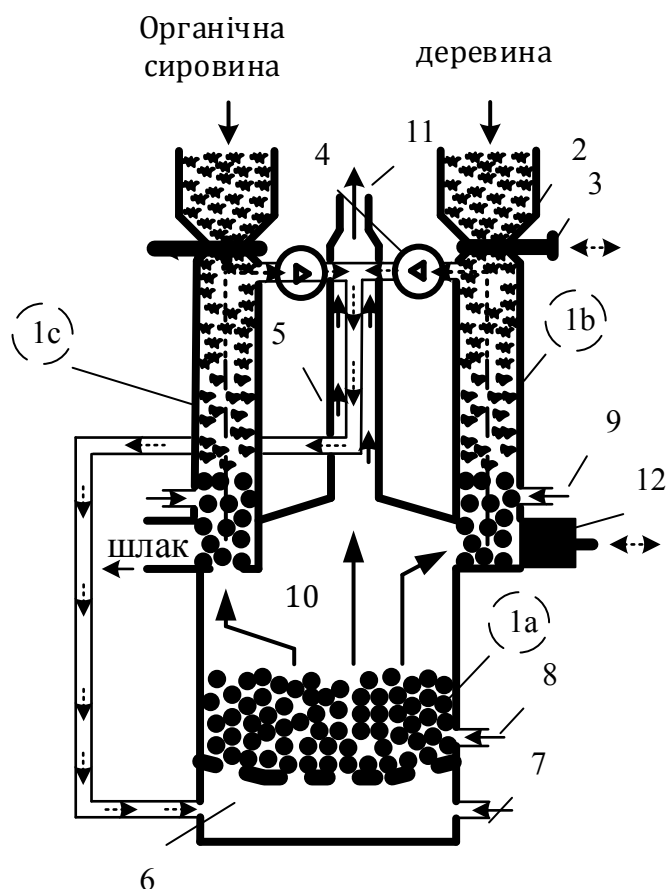


Рисунок 4.13 – Принципова схема влаштування термічної деструкції органічної сировини

Принцип роботи розглянемо на прикладі використання як вихідної сировини деревних відходів.

Робота на заданому режимі. У процесі роботи висока температура деревного вугілля в 1a може підтримуватися різними способами:

- шляхом продовження його горіння при подачі окислювача через 8;

- шляхом часткового окислення (спалювання) частини піролізних газів, що надходять у 6, під час подавання окислювача через 7 і проходження продуктів горіння через шар деревного вугілля;

- шляхом комбінації перших двох способів.

У міру карбонізації деревних відходів деревне вугілля, що утворилося, з нижнього сегмента 1b за допомогою пристрою 12 подається в 1a. З бункера 2 через клапан 3 відбувається поповнення піролізної частини 1b ГГ.

У процесі роботи ГГ управління процесом може здійснюватися за рахунок:

- зміни продуктивності димососа 4;
- зміни місця подачі окислювача (7, 8 або 9), різного угруповання цих місць, зміни об'ємів окислювача, що подається;
- зміни об'єму (швидкості) подачі деревного вугілля з нижнього сегмента частини 1b в 1a, зміни об'єму (швидкості) подачі вихідної сировини з бункера 2.

4.3.4 Розрахунок параметрів процесу газогенерації (з прикладу деревних відходів)

У рамках процесу термодеструкції вихідної сировини в ГГ можна виділити три складові частини: піроліз, горіння і газифікацію. Різні види ГГ відрізняються порядком проходження цих процесів. Процес вільного горіння різних речовин також включає ці три процеси. У разі прийняття моделі рівноважних хімічних реакцій у процесі вільного горіння вона може бути реалізована на основі методу [135]. Під час використання ГГ для отримання газоподібних продуктів мається на увазі використання процесу повільного піролізу і, відповідно, протікання хімічних реакцій, близьких до рівноважних. Отже, і в цьому випадку для опису параметрів процесу може бути використаний метод [135], але з деякими особливостями.

У разі вільного горіння подається кількість окислювача, необхідна для максимального ступеня окислення елементів вихідної сировини. У результаті продукти реакції перебувають у газоподібному стані (за винятком мінеральних речовин у вигляді золи). Вони мають мінімальну ентальпію, що визначається їхньою хімічною формулою. Більша частина ентальпії вихідної сировини реалізується у

внутрішній енергії газоподібних продуктів реакції (їхній температурі). На противагу цьому в газоподібних продуктах роботи ГГ, що визначається їхньою хімічною формулою, прагнуть зберегти якомога більшу частину ентальпії вихідної сировини. Для цього забезпечують мінімально необхідну температуру газифікації вихідної сировини завдяки обмеженню кількості окислювача, що подається. Як особливість з'являється частина не газифікованого вуглистого залишку.

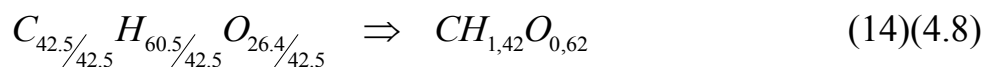
Ентальпія продуктів роботи ГГ, що визначається їхньою хімічною формулою, тим вища, чим більша додаткова енергія, що вноситься в систему в процесі реакції. У ГГ (рис. 4.13) для цього використовується теплообмінник 5. З його допомогою частина внутрішньої енергії газоподібних продуктів повертається в систему. Це визначає особливість запису моделі процесу. У балансі ентальпії необхідно враховувати не тільки ентальпію вихідної сировини й ентальпію окислювача, а й додаткову енергію, що вноситься через теплообмінник.

Підготовка вихідних даних

Склад горючої частини деревини різних порід приблизно однаковий. Під час теплотехнічних розрахунків зазвичай приймають: С = 51; Н = 6.1; О = 42.3; N = 0.6%. Через наближеність розрахунків малою часткою азоту можна знехтувати. Виходячи з цього розглянемо брутто-формулу органічної частини сухих соснових відходів (без урахування вологості) у вигляді:



з ентальпією $I = -6516$ кДж/кг. Для спрощення розрахунків запишемо (4.7) у вигляді:



з молярною масою

$$\mu_c = 0.0233 \text{ кг/моль} \quad (15)(4.9)$$

та ентальпією одного моля цього складу

$$I_0 = -152.1 \text{ кДж/моль} \quad (16)(4.10)$$

Наведені дані належать до абсолютно зневодненої деревини. Визначимо склад (брутто-формулу) та ентальпію деревних відходів сосни за різної відносної вологості. Будемо виходити з визначення відносної вологості як:

$$\varphi = \frac{x}{\mu_c + x}, \quad (16)(4.11)$$

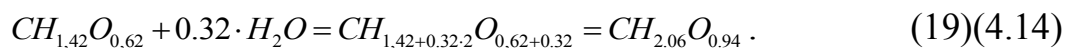
де μ_c - молярна маса (4.9) абсолютно зневодненої деревини сосни, x - маса води. Із (4.11) випливає:

$$x = \frac{\varphi}{1 - \varphi} \cdot \mu_c. \quad (17)(4.12)$$

З урахуванням молярної маси води $\mu_6 = 0.018 \text{ кг/моль}$ з (4.12) визначається відповідна кількість молей води, що визначає розглянуту вологість. Наприклад, із (4.12) випливає, що за вологості $\varphi = 0.2$ (20%) з 1 молем деревини (4.9) має бути пов'язано

$$x = \frac{0.2}{1 - 0.2} \cdot 0.0233 \approx 0.0058 \text{ кг} \quad (18)(4.13)$$

води, що відповідає $\sim 0,32$ моля. У цьому разі брутто-формула деревини з урахуванням (4.8) за такої вологості матиме вигляд:



За величини ентальпії води (табличне значення) $I_g = -285.8$ кДж/моль з урахуванням (4.10) ентальпія деревини за вологості 20% дорівнює:

$$I_{0.2} = I_0 + 0.32 \cdot I_g = -243.6 \text{ кДж / моль} \quad (20)(4.15)$$

Розраховані за таким алгоритмом брутто-формули вологої деревини та відповідні їй ентальпії для деяких значень вологості φ наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Брутто-формули та ентальпії деревини сосни

φ	0	0.2 (20%)	0.4 (40%)	0.6 (60%)
Брутто-формула	$CH_{1.42}O_{0.62}$	$CH_{2.06}O_{0.94}$	$CH_{3.15}O_{1.48}$	$CH_{5.3}O_{2.56}$
Ентальпія (кДж/моль)	-152.1	-243.6	-398.8	-706.6

У розрахунках окрім різних величин коефіцієнта надлишку окиснювача α ($\alpha < 1$) і різних величин вологості φ , може бути врахована частина енергії, що повертається в зону реакції завдяки теплообміннику 5 (рис. 4.13). Облік цієї частини енергії можливий на основі такого алгоритму:

- з усього складу продуктів газогенерації вибирають тільки газоподібні компоненти (за виключенням вугільного залишку) і визначають ентальпію I_z цієї газової суміші за температури процесу газогенерації;

- для цього ж складу газової суміші визначається ентальпія I_{oc} при температурі навколишнього середовища. При цьому вважається, що вода залишається в пароподібному стані (так само, як і при визначенні нижньої теплотворної здатності);

- різниця $\Delta I = (I_z - I_{oc})$ визначає максимально можливу величину енергії, яка може бути отримана при охолодженні газоподібної складової продуктів газогенерації. Частина (у відсотковому відношенні) цієї енергії додається до ентальпії вихідної речовини (20). В ітераційному процесі шукається розв'язок вихідної моделі.

Якість газоподібної складової продуктів газогенерації, одержуваних за різного поєднання величин α , φ і ΔI , може бути оцінена за сумарною теплотою згоряння простих газів (табличні величини), що входять до її складу. Слід врахувати, що під час зберігання в газгольдері або транспортування трубопроводом спочатку гарячі продукти газогенерації в багатьох випадках остигають практично до температури навколишнього середовища. Пари води, що входять до їхнього складу, практично повністю конденсуються і не враховуються при визначенні теплоти згоряння. Залишаються тільки горючі гази (CO , H_2 , CH_4) і вуглекислий газ (CO_2) як баласт. Співвідношення їхніх обсягів відоме з результатів розв'язання задачі визначення складу продуктів газогенерації.

Перелік і діапазон зміни параметрів розрахунку

У процесі розрахунків органічна частина вихідної сировини залишалася незмінною. Але мольний склад у вигляді його брутто-формули і, відповідно, молярна маса були змінними. Це відбувалося внаслідок урахування мінливої вологості деревини в діапазоні $\varphi = [0 \dots 0,6]$.

У процесі розрахунку враховувалася можливість повернення частини енергії гарячих газоподібних продуктів термодеструкції, що йдуть, через теплообмінник 5 (рис. 4.13) у зону реакції. Враховувалася частина енергії у формі тепла. Кількість енергії, що повертається, визначали у відсотковому співвідношенні в діапазоні $\Delta I = [0 \dots 70\%]$.

Процес термічної деструкції сировини розглядався у двох варіантах:

- з внутрішнім виділенням енергії за рахунок подачі окислювача (кисню) зі зміною коефіцієнта надлишку в діапазоні $\alpha = [0,2 \dots 0,6]$. Використання більшої кількості окислювача відповідало більшій вологості вихідної сировини;
- із зовнішнім підведенням енергії (без використання окислювача) - повільний піроліз.

Перелік величин результатів розрахунку

Для кожного поєднання значень параметрів розрахунку визначалися:

- температура рівноважної реакції;

- кількість молей вихідної речовини (з урахуванням вологості), необхідну для утворення 1 моля газоподібних продуктів реакції. Кількість конденсованої фази (вуглистый залишок) враховується окремо;
- склад продуктів реакції в мольних частках;
- нижча теплотворна здатність охолодженої газоподібної частини продуктів реакції (з урахуванням наявності вуглекислого газу, але без урахування парів води);
- нижча теплотворна здатність охолодженої газоподібної частини продуктів реакції, віднесена до 1 моля вихідної речовини (з урахуванням вологості).

Результати обчислень

Оцінка адекватності результатів розрахунку

Адекватність результатів розрахунків може бути оцінена шляхом їх порівняння з даними експериментальних досліджень. Але в галузі газифікації органічних речовин спостерігається широкий розкид експериментальних даних різних авторів [132–133]. Порівняємо результати розрахунку з діапазонами варіювання експериментальних значень деяких величин.

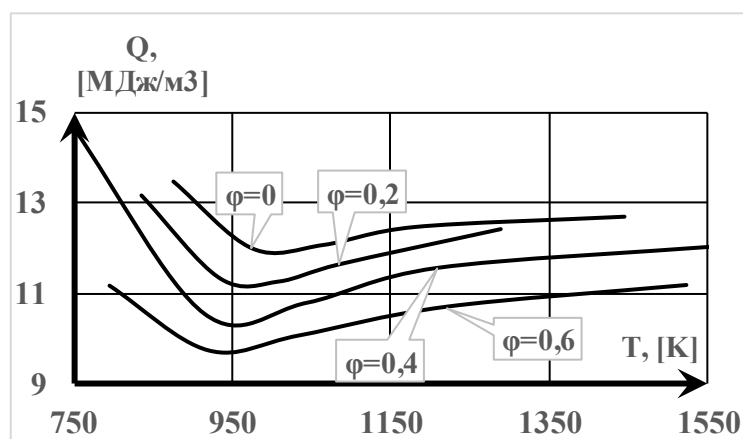


Рисунок 4.14 – Нижча теплотворна здатність піролізного газу за різної вологості деревини

У [132] наведено величину характерного значення нижчої теплотворної здатності піролізних газів у діапазоні 13 – 15 МДж/м³. Як правило експериментальні

дослідження проводяться на зразках деревини повітряно сухої ($\varphi=0.15-0.2$) або кімнатно сухої ($\varphi=0.08-0.1$). На рис. 4.14 відображено результати розрахунку нижчої теплотворної здатності піролізних газів на основі запропонованої моделі за різної вологості деревини. З нього випливає, що за вологості $\varphi=0-0.2$ у діапазоні температур 800 - 900 К розрахункові величини відповідають експериментальним даним. Такі температури в багатьох випадках є характерними при дослідженнях процесу повільного піролізу.

При збільшенні температури і вологості сировини зростає частка водню в піролізних газах. Цей газ має високу гравіметричну характеристику теплотворної здатності. Але його теплотворна здатність, віднесена до одиниці об'єму, є низькою. Збільшення частки водню в суміші горючих газів зменшує її об'ємну теплотворну здатність. Такий ефект також відображається результатами розрахунку (рис. 4.14). Слід зазначити, що при цьому об'єм піролізних газів збільшується за рахунок конверсії парів води та вуглистого залишку (деревного вугілля).

У [133] зазначено, що низка авторів вказують на збільшення виходу газу і зниження його теплотворної здатності зі зростанням температури не тільки за піролізу (що відображено на рис. 4.14), а й за газифікації. За більш високих температур газифікації спостерігається менша кількість твердих частинок.

Виконані розрахунки показали, що подібний ефект існує, але лише за деяких умов. Можливо, що цей ефект відзначають ті автори, які проводили експериментальні дослідження за відповідних умов. Результати розрахунків показують, що зниження теплотворної здатності відбувається лише в деякому діапазоні зміни температури реакції. За відсутності підведення додаткової зовнішньої енергії або за підведення зовнішньої енергії постійної величини температура реакції газифікації змінюється внаслідок зміни величини α – коефіцієнта надлишку окислювача. Зі збільшенням значення α збільшується і температура реакції. Слід (або можна) говорити про залежність теплотворної здатності генераторного газу від коефіцієнта надлишку окислювача за деяких умов у реакції газогенерації. На рис. 4.15 і рис. 4.16 наведено графіки зміни нижчої теплотворної здатності генераторного газу для випадку відсутності зовнішнього

підведення енергії. Нагрівання зони реакції відбувається тільки за рахунок внутрішнього виділення енергії під час окислення частини вихідної сировини. На рис. 4.15 відображено зміну теплотворної здатності залежно від температури в зоні реакції. На рис. 4.16 - залежно від коефіцієнта надлишку окислювача. З наведених графіків випливає, що в умовах, які розглядаються, зі збільшенням температури в зоні реакції зменшення теплотворної здатності газу може відбуватися під час переробки абсолютно сухої вихідної сировини.

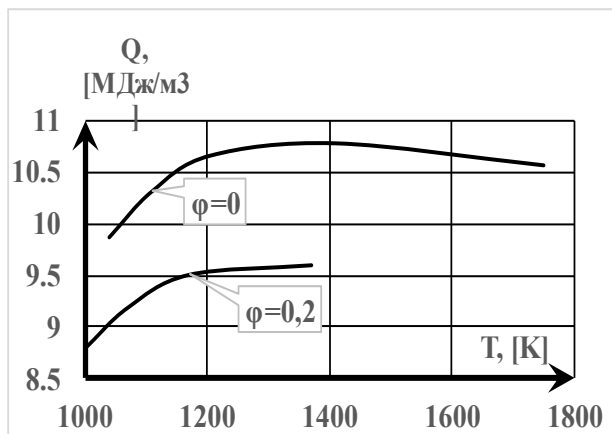


Рисунок 4.15 – Зміна нижчої теплотворної здатності залежно від температури в зоні реакції за відсутності зовнішнього підведення енергії

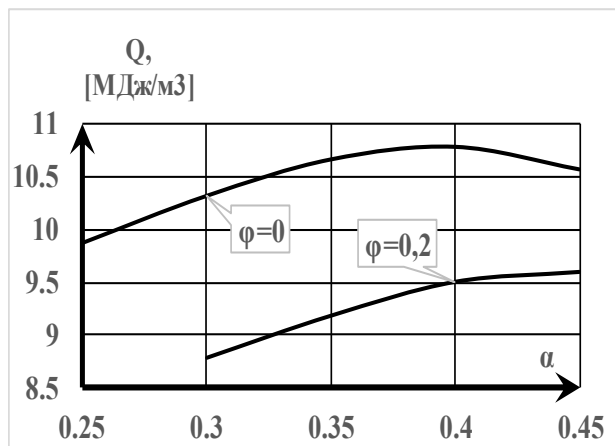


Рисунок 4.16 – Зміна нижчої теплотворної здатності залежно від коефіцієнта надлишку окислювача в зоні реакції за відсутності зовнішнього підведення енергії

На рис. 4.17 і рис. 4.18 наведено графіки зміни нижчої теплотворної здатності генераторного газу для випадку зовнішнього підведення частини енергії в зону

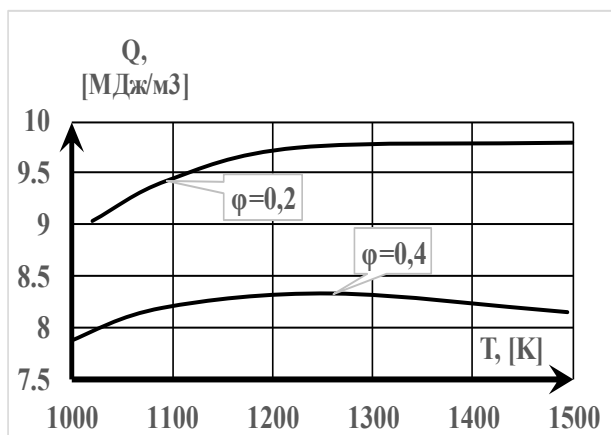


Рисунок 4.17 Зміна нижчої теплотворної здатності залежно від температури в зоні реакції за наявності зовнішнього підведення енергії

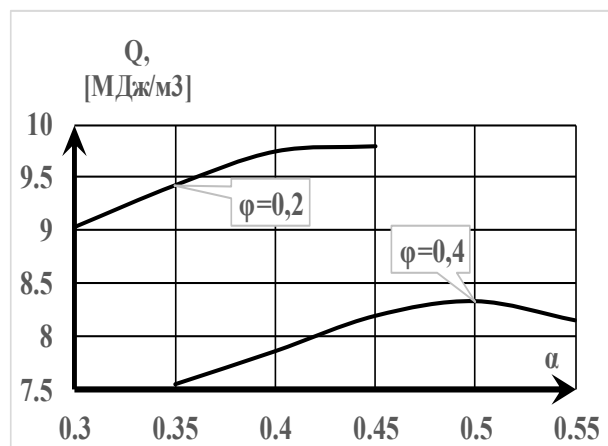


Рисунок 4.18 Зміна нижчої теплотворної здатності залежно від коефіцієнта надлишку окислювача в зоні реакції за наявності зовнішнього підведення енергії

реакції, наприклад, за допомогою теплообмінника 5 (рис. 4.13). У разі, що розглядається, передбачається повернення в зону реакції 25% енергії газів 11 (рис. 4.13), що залишають установку. З наведених графіків випливає, що в умовах, які ми розглядаємо, зі збільшенням температури в зоні реакції зменшення теплотворної здатності газу може відбуватися під час переробки вихідної сировини великої вологості ($\varphi=0.4$).

Кількісне порівняння результатів розрахунків параметрів процесу газогенерації з експериментальними даними складне. Розкид експериментальних значень великий. Так у [15] після аналізу даних низки авторів наводяться такі діапазони зміни об'ємної концентрації газів: для CO 9 - 35 об%; для H_2 2 - 35 об%; для CH_4 1 - 5 об%; для CO_2 9,5 - 15 об%. У [133] (табл. 5 4.3?) наведено дані за складом генераторного газу в разі дуття киснем. Описано тільки склад генераторного газу і його нижчу теплотворну здатність. Доводиться тільки припускати про параметри процесу, яким відповідають наведені величини. Будемо вважати, що в [133] розглядається процес без введення додаткової енергії. У

багатьох дослідженнях зразки вихідної сировини перед газифікацією сушать. Будемо розглядати процес газифікації абсолютно сухої сировини деревини сосни. Кількість окислювача в [133] не обумовлюється. Розглянемо випадок $\alpha=0.35$. Для зазначених умов дані з [133] і результати розрахунку на підставі моделі, що подається, наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Продукти газифікації при кисневому дутті

Джерело даних	Складові (% об'єму)					$Q_{\text{низ}}$ МДж/м ³
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	
[133]	32	48	15	2	3	10.4
Розрахунок	35.5	48.4	16.1	0	—	10.7

Розглянутому варіанту відповідає розрахункова температура 1205 K (932 °C). Дані, наведені в табл. 4.2, свідчать про добрий збіг за означених умов експериментальних і розрахункових величин. Відсутність N₂ у розрахунках визначено розглянутим варіантом моделі, що не враховує через малу кількість наявності азоту у вихідній сировині. Нульове значення для метану може бути пояснене використанням для розрахунку рівноважної моделі. В її рамках передбачається, що всі можливі процеси термічної деструкції завершені. В експериментальних дослідженнях час перебування газової суміші в реакційній зоні обмежений. Наявність метану в багатьох випадках (але не у всіх) може свідчити про незавершеність термічного розкладання вихідної органічної сировини. Але на можливість присутності метану в продуктах піролізу і газогенерації за деякого поєднання параметрів процесу вказують і результати розрахунку за рівноважною моделлю. Деякі з них наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Склад продуктів газогенерації

ΔI	φ	α	$T, [K]$	Кількість молей							$Q_{\text{низ}}$ МДж/м ³
				M_T	CO	CO_2	CH_4	$C_{\text{угл}}$	H_2	H_2O	
0	0	0.25	1040	0.74	0.29	0.19	0.004	0.25	0.35	0.17	9.9
		0.3	1110	0.67	0.36	0.16	0.001	0.14	0.33	0.14	10.3
	0.4	0.35	900	0.45	0.05	0.25	0.007	0.15	0.24	0.45	7.3
		0.4	980	0.42	0.10	0.24	0.001	0.08	0.27	0.39	7.7
40%	0	0.2	1010	0.79	0.25	0.20	0.008	0.34	0.36	0.18	9.9
		0.25	1075	0.71	0.33	0.17	0.002	0.21	0.35	0.14	10.3
	0.4	0.35	940	0.44	0.07	0.24	0.004	0.12	0.27	0.41	7.7
		0.4	1010	0.41	0.11	0.24	0.001	0.06	0.28	0.37	8.0

У табл. 4.4 на відміну від табл. 4.3 наведені величини всіх компонентів газогенерації, що враховуються в розрахунках, зокрема водяна пара і вуглисті залишок. Сумарно кількість компонентів, що перебувають у газоподібному стані, дорівнює 1 молю (за умовами методу розрахунку). Усі газоподібні компоненти разом із вуглистим залишком утворені з кількості молей вихідної сировини, позначених як M_T . Величина ΔI позначає частку енергії газоподібних продуктів реакції, що повертається в зону реакції, через теплообмінник 5 (рис. 4.13)

У таблиці 4.5 подано результати розрахунку, що відповідають піролізу деревної сировини (тільки за рахунок зовнішнього обігріву, без використання окислювального агента).

Таблиця 4.5 – Склад продуктів піролізу

φ	$T, [K]$	Кількість молей							$Q_{\text{низ}}$ МДж/м ³
		M_T	CO	CO_2	CH_4	$C_{\text{угл}}$	H_2	H_2O	
0.2	835	0.85	0.03	0.18	0.094	0.55	0.28	0.41	13.2
	1010	0.67	0.2	0.12	0.014	0.34	0.48	0.19	11.3
	1290	0.54	0.42	0.02	0	0.10	0.51	0.04	12.4
0.4	750	0.60	0.01	0.14	0.095	0.36	0.16	0.60	14.6
	1045	0.45	0.18	0.12	0.004	0.14	0.46	0.23	10.8
	1580	0.40	0.34	0.04	0	0	0.47	0.15	12.1

Результати розрахунку, наведені в таблиці 4.5, відповідають даним експериментальних досліджень інших авторів. У піролізних газах присутня більша ніж у газогенераторних кількість метану. Зі зростанням температури його кількість

зменшується аж до повного зникнення. Це може бути пояснено збільшенням ступеня конверсії метану на розпеченому вуглистому залишку (деревному вугіллі) в присутності парів води. Збільшується кількість водню і чадного газу з одночасним зменшенням вуглистого залишку аж до повної його конверсії. Зі збільшенням температури в реакційній зоні теплотворна здатність $Q_{\text{низ}}$ газоподібної фази зменшується. Це можна пояснити зменшенням частки найкалорійнішого газу метану та збільшення частки найменш калорійного водню. Слід зазначити більш значне зниження теплотворної здатності при середній температурі в реакційній зоні з деяким її підвищенням зі зростанням температури.

4.3.5 Зменшення викидів парникових газів під час керування об'ємом димових газів

У традиційних газових котлах, що працюють на паливі постійного складу, регулювання потужності здійснюється шляхом зміни обсягу газо-повітряної суміші. Цей метод безпосередньо впливає на температуру димових газів і, відповідно, на ефективність використання котла. При зменшенні потужності котла зменшується об'єм продуктів згоряння, їхня швидкість в газовому тракті спадає, і збільшується час їх взаємодії з поверхнями теплообміну. Це призводить до зниження температури відпрацьованих газів і підвищення ККД котла. Максимальна потужність котла відповідає мінімальному значенню ККД системи. Різниця в температурі димових газів у всьому діапазоні регулювання потужності котла призводить до збільшення втрат на максимальному навантаженні та максимальній витраті газу. Проте цю різницю можна зменшити, зберігаючи діапазон регулювання, шляхом зниження нахилу графіків зміни температури димових газів і, відповідно, ККД. Наприклад, зберігаючи об'єм продуктів згоряння, що відповідає максимальній потужності, можна уникнути збільшення температури димових газів і зниження ККД.

Збереження об'єму продуктів згоряння при зменшенні навантаження може бути забезпечене за рахунок заміни частини основного палива менш тепловмісним альтернативним паливом. Цей альтернативний газ повинен мати специфічні

властивості, зокрема, давати більше продуктів згоряння на одиницю теплової здатності порівняно з основним газом.

Метод вибору альтернативного газу. Для вибору альтернативного газу, розглянемо як основне паливо природний газ, складений переважно з метану. Як альтернативи розглянемо гази, що мають меншу тепловмісну здатність, такі як BFG, COG, газоподібні компоненти, отримані при піролізі деревини, або продукти газифікації деревних відходів. Середній склад таких газів наведено у таблиці. Ці гази мають нижчу тепловмісну здатність порівняно з природним газом.

Таблиця 4.6 – Склад (об'ємні частки) та характеристики горючих газів

Склад, характеристики	NG	COG [134]	BFG [134]	піролиз	газогенерація
C H ₄	1	0.267	—	0.18	—
C ₂ H ₄	—	0.026	—	—	—
H ₂	—	0.571	0.036	0.02	0.134
CO	—	0.029	0.254	0.3	0.246
H ₂ O	—	—	—	—	0.085
CO ₂	—	0.042	0.195	0.5	0.058
N ₂	—	0.065	0.515	—	0.476
$Q_{\text{н}}, \frac{\text{МДж}}{(\text{м}_{\text{гг}})^3}$	35.8	17.7	3.4	15	4.57
$V_{\text{дг}}, \frac{(\text{м}_{\text{дг}})^3}{(\text{м}_{\text{гг}})^3}$	10.52	5.04	1.51	3.31	1.71
$\omega, \frac{(\text{м}_{\text{дг}})^3}{\text{МДж}}$	0.294	0.285	0.444	0.221	0.375

Для визначення впливу цих альтернативних газів на обсяг димових газів при їх змішуванні з природним газом, введемо величину ω , що відповідає обсягу димових газів, утворених при спалюванні одиниці відповідного газу за його тепловою здатністю. Значення цієї величини наведено у таблиці.

В таблиці 4.6 наведені значення параметрів $Q_{\text{н}}$, $V_{\text{дг}}$ та ω , що характеризують теплові властивості та обсяг димових газів, що утворюються під час спалювання газоподібного палива. При цьому повітря вважалось окислювачем і складалося

виключно з кисню та азоту з об'ємним співвідношенням 0.79/0.21, що відповідає природному складу атмосферного повітря, а коефіцієнт надлишку окислювача α приймався рівним 1, що є демонстраційним варіантом.

Порівняння отриманих значень цих параметрів для альтернативних газів з аналогічними для природного газу (NG) дозволяє зробити висновок про можливість різних сценаріїв зміни обсягу димових газів. Наприклад, зміна навантаження при використанні суміші газів зі змінним співвідношенням NG та біогазу (BFG) з деяким значенням ω дозволить підтримувати обсяг димових газів близьким до стабільного рівня. Також використання суміші газів, які мають меншу величину ω , таких як піролізний газ або газ з вугільного розкладу (COG), порівняно з NG при однакових навантаженнях, призведе до зменшення обсягу димових газів.

Таблиця 4.7 – Склад суміші NG + BFG для різного навантаження котла при $\alpha=1,1$.

Частка навантаження, $Q/Q_{\max}$	Об'єм суміші горючих газів, м^3	% метану в суміші	T_a , К	Об'єм димових газів
1	1	100	2182	11,47
0,95	1,9	44,7	2083	11,44
0,9	2,79	25,1	1991	11,41
0,85	3,69	14,9	1894	11,38
0,8	4,58	8,7	1796	11,35
0,75	5,48	4,6	1700	11,32
0,71	6,08	2,5	1636	11,30
0,66	6,97	0	1543	11,26
0,6	6,32	0	1543	10,21
0,5	5,26	0	1543	8,51
0,4	4,21	0	1543	6,81

Приклад результатів розрахунку. Наведемо приклад результатів розрахунку для сценарію збереження об'єму димових газів на стабільному рівні при зменшенні навантаження котла. Результати отримані на основі повіркового теплового розрахунку з використанням нормативного методу для котла типу КВ-ГМ-4.65. Для цього використовувалися дані, що відповідали суміші газів зі змінним вмістом NG

та BFG. Об'єм димових газів підтримувався на рівні, що відповідає максимальному при спалюванні лише NG (максимальне навантаження). Розрахунки проводилися з незначними відхиленнями, що впливають на загальний характер зміни параметрів. Розглянуто випадок, коли коефіцієнт надлишку повітря α становить 1,1.

Адіабатна температура горіння (T_a) для природного газу (NG) за прийнятих умов встановлена на рівні 2182 Кельвінів. При зміні співвідношення між природним газом та доменним газом (BFG) відповідно до навантаження, значення T_a також змінюється. Це значення визначається за допомогою хімічних ентальпій утворення газів, що утворюються під час горіння, на основі теплотворних здібностей відповідних горючих газів та складу їх суміші. У Таблиці 4.7 наведено склад суміші NG + BFG, а також адіабатні температури горіння цієї суміші та обсяг димових газів, що утворюються, для різних навантажень котла. Значення наведено для умов, коли використовується тільки NG. Максимальний об'єм димових газів вказаний для нормальних умов спалювання 1 м³ NG. Максимальна потужність досягається за умови використання тільки NG. Об'єм димових газів, що залишається сталим, може бути забезпечений тільки при навантаженні, що дорівнює 0,66 від максимального. На цій точці паливо включає лише BFG. Результати розрахунків ККД та температури димових газів представлені на Рисунках 4.19 та 4.20 відповідно.

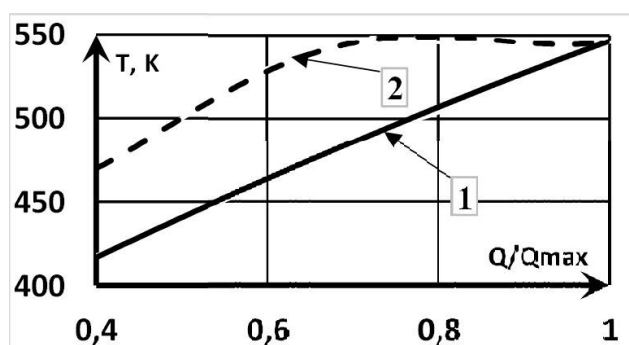


Рисунок 4.19 – Зміна ККД при зміні навантаження котла 1 – NG; 2 – суміш NG+BFG змінного відношення

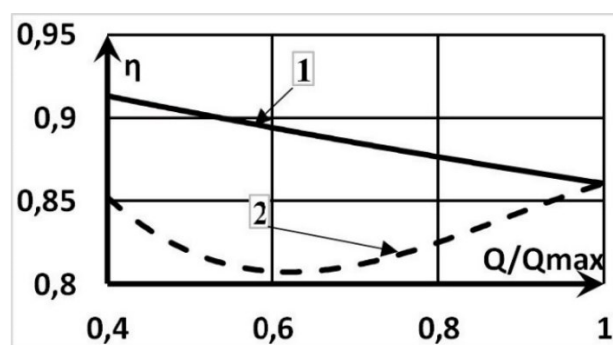


Рисунок 4.20. Зміна температури димових газів при зміні навантаження котла: 1 – NG; 2 – суміш NG+BFG змінного відношення

Порівняльний аналіз демонструє, що використання суміші газів змінного складу призводить до трансформації графіків зміни коефіцієнта корисної дії (ККД) та температури димових газів. Це особливо помітно при зміні навантаження під час роботи з сумішшю газів регульованого складу. Зменшення ККД при підвищеній, але стабільній температурі димових газів не є негативним явищем. Варіація їхньої динаміки дозволяє збільшити площу теплообміну (зокрема, за допомогою економайзера) без ризику утворення конденсату при низьких навантаженнях.

Подальше зменшення навантаження може відбуватися за рахунок скорочення кількості відходів виробництва (BFG), оскільки метан в цьому випадку відсутній. Зміна ККД та температури димових газів відповідає використанню газу сталого складу. При малих навантаженнях зниження ККД при використанні BFG (навіть після розширення площі теплообміну) також не є критичним. У таких умовах енергетичні втрати мінімізовані, оскільки допоміжний газ використовується мінімально. Підвищення ККД спостерігається при максимальному навантаженні та використанні великої кількості природного газу (NG), що призводить до максимальної економії та зменшення викидів парникових газів, зокрема CO₂.

Одним з факторів, які ускладнюють впровадження такої схеми роботи котла, є потреба у значному збільшенні обсягу використаної газової суміші. Існуючі пальники на котлах не мають достатньої пропускної здатності для цього. Тому для реалізації цієї концепції необхідно встановлювати спеціально розроблені додаткові пальники.

4.4 Висновки по розділу

Була розроблена імітаційна математична модель установки термодеструкції органічних речовин на основі її опису, що дає змогу дослідити її динамічні властивості. Основні канали регулювання являють собою інерційну ланку першого порядку із запізнюванням. Параметри цієї ланки, такі як постійна часу і величина запізнювання, залежать від геометричних розмірів установки і потребують індивідуального налаштування для кожної конкретної установки.

Встановлено, що на етапі моделювання існують режими роботи, за яких установка може перейти зі стійкого стану в нестійкий через наявність позитивного зворотного зв'язку. Це обумовлено співвідношенням між витратами вихідної сировини і витратою рециркуляційного газу. Наявність регуляторів дає змогу стабілізувати технологічний процес піролізу на заданих значеннях.

Показано, що на етапі моделювання автоматичної системи регулювання достатньо використовувати одноконтурні регулятори. Вимкнення будь-якого з регуляторів призводить до погіршення якості регулювання, проте система загалом продовжує функціонувати стабільно.

Встановлено, що система регулювання добре справляється зі збуреннями. За різноспрямованих збурень (зміна витрати продукт-газу і зміна теплотворної здатності) досягається максимальне значення продукт-газу. За співспрямованих збурень (зміна витрати продукт-газу і теплотворної здатності вихідної сировини) теплотворна здатність палива становить близько 98% від максимально можливого значення.

Побудова моделі газифікації деревної сировини за допомогою кисневого дуття відкрила широкі можливості в демонстрації ефективності запропонованого методу, спрямованого на зменшення обчислювальних витрат. Розширення переліку хімічних реакцій у моделі відкриває можливості для єдиної підходу до вивчення процесів горіння, піролізу та газифікації. У процесі можуть застосовуватися різні окислювальні агенти, такі як повітряне, кисневе, пароповітряне, парокисневе та парове дуття. Також можна врахувати різні способи введення додаткової зовнішньої енергії, наприклад, через огорожувальні конструкції (теплообмінники) або за допомогою парового дуття.

У роботі розглянуто використання суміші горючих газів і запропоновано параметр ω , що визначає здатність різних горючих газів до утворення певного обсягу димових газів на одиницю теплотворної здатності. Цей параметр дозволяє вибирати допоміжні гази, які в суміші з природним газом забезпечують температуру димових газів, близьку до постійної у широкому діапазоні навантаження. Гази можуть бути ранжовані за ступенем переваги використання паливної суміші на

основі величини цього параметра. На прикладі газу, отриманого з газогенератора, показано можливість регулювання величини ω шляхом зміни параметрів процесу газифікації. Це дозволяє підвищити гнучкість керування температурою відпрацьованих газів при зміні навантаження котла.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором нові науково обґрунтовані результати, що дали змогу підвищити ефективність використання енергоресурсів, одержуваних у процесі керованої термодеструкції органічної сировини змінного складу, та зменшити вплив на навколишнє середовище за рахунок ідентифікації складу сировини методами та моделями розрахунку рівноважного складу продуктів розкладання.

1. Виконано аналіз джерел органічних відходів. Виділено дві групи: відходи рослинного походження (біомаса) і побутові відходи. Усі вони можуть слугувати сировиною для термодеструкції з метою отримання горючих продукт-газів. Таке їх використання, з одного боку, сприяє розв'язанню економічних проблем. Такі гази можуть слугувати альтернативою природному газу і знизити вартість отримання енергії. З іншого боку, термодеструкція органічних відходів сприяє розв'язанню екологічних проблем, зменшуючи кількість відходів, що підлягають захороненню на полігонах. Крім того, використання продукт-газів в енергетиці знижує парниковий ефект через зменшення обсягів спалювання природного газу.

Але для кожної з груп відокремлено й недоліки, що ускладнюють їхнє використання. До них слід віднести, зокрема, необхідність використання відмінних технологій термодеструкції для переробки різних груп відходів, необхідність їх попередньої підготовки, сортування побутових відходів. Визначено необхідність розроблення єдиної технології термічної переробки різних видів органічних відходів без попередньої їх підготовки.

2. Розроблення єдиної технології для термічної переробки різних видів органічних відходів пов'язане з розв'язанням задачі визначення складу продукт-газу в процесі його утворення (в режимі реального часу). На цій основі можна визначити поточний склад сировини, що переробляється, та оптимізувати процес її термодеструкції (піроліз - газифікація - горіння). В основу рішення покладено методи хімічної кінетики рівноважного процесу термічного розкладання органічних речовин. У процесі термодеструкції вихідної сировини в продуктах розкладання присутня як газоподібна, так і конденсована фази (вугільний залишок). Для

можливості врахування цієї особливості модифіковано наявну модель. Замість концентрацій або парціальних тисків компонентів продуктів розкладання запропоновано використовувати їхні мольні частки. Для цього потрібна була адаптація констант хімічної рівноваги. Їх довідкові величини для використання в рівняннях з парціальними тисками. Крім того, модифіковано низку рівнянь моделі для можливості врахування кількості утворених речовин, що перебувають в обох фазах. Показано працездатність модифікованої моделі. Шляхом порівняння отриманих результатів із довідковими даними подібних процесів виконано верифікацію та валідацію моделі.

3. Визначення складу вихідної сировини за кількісним складом продуктів термодеструкції є зворотним завданням. На підставі вимірів технологічних параметрів проводиться визначення складу спалюваного пального. Показано, що розв'язок цього завдання існує і єдиний. Але спроба знайти рішення показала його нестійкість. Таким чином, сформульована задача, як і більшість зворотних задач, є некоректно поставленою. Для її розв'язання використано метод бібліотеки.

На першому етапі в невиробничих умовах відбувається заповнення бібліотеки. Багаторазово розв'язується пряма задача визначення складу продуктів розкладання за заданого складу вихідної сировини. Склад вихідної сировини і її ентальпія змінюються в заданому діапазоні для кожного рішення. На другому етапі у виробничих умовах у процесі спалювання продукт-газу в спеціальному пристрої на основі заміряних технологічних параметрів (витрата газу і повітря, температура продуктів згоряння) з бібліотеки вибирають результати розв'язування прямої задачі, що відповідають цим параметрам. У рамках дисертаційної роботи запропоновано спосіб вибору з бібліотеки відповідних результатів розв'язання прямої задачі. Метод ґрунтується на формуванні стека значень технологічних параметрів для різних випробувань. Пошук відбувається шляхом зміни позиціонування в стеку відповідних параметрів для кожного випробування.

4. Оптимальну систему керування можна побудувати за відомої моделі об'єкта керування. У багатьох випадках аналітична побудова такої моделі ускладнена, але є експериментальні дані щодо реакції об'єкта на стандартні зовнішні впливи.

Запропоновано спосіб побудови на основі цих даних моделі у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь, розв'язок якої відповідає цим даним. Відповідно до цього способу на першому етапі експериментальні дані апроксимуються за допомогою ряду з подальшим застосуванням до нього перетворення Лапласа. Одержаний у просторі зображень ряд перетворюється за допомогою апроксимації Паде. Результатом такої дії є раціональний дріб у просторі зображень. Фактично він являє собою передавальну функцію деякої моделі. Її розв'язок відповідає використаним експериментальним даним.

Побудовано модель системи керування спільною роботою пристрою термодеструкції органічних відходів довільного складу та котла, що використовує як пальне отриманий продукт-газ. Використано модель визначення в процесі роботи пристрою термодеструкції за допомогою методу бібліотеки складу сировини, що переробляється. Відомий склад сировини і модель об'єкта дають змогу сформулювати керуючий вплив, що дає змогу отримати максимальну кількість продукт-газу за максимально можливої його теплотворної здатності. Впливає і поточне навантаження котла, що використовує продукт-газ.

Спільне використання в котельному обладнанні як палива суміші регульованого складу природного газу та отриманого продукт-газу може збільшити середнє значення ККД котла при зміні його навантаження. Такий ефект досягається за рахунок зменшення різниці величин ККД на мінімальному і максимальному навантаженні. Можливість роботи котла за такою схемою продемонстровано в дисертаційній роботі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Obsyag virobnitstva, urozhainist ta zibrana ploshcha silskogospodarskikh kultur za ikh vidami po regionakh. (2018) // Derzhstat Ukraïni: Arkhiv 2018. [URL://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/sg/ovuzpsg/Arh_ovuzpsg_u.html](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/sg/ovuzpsg/Arh_ovuzpsg_u.html)
2. Obem proizvodstva, urozhainost i sobrannaya ploshchad selskokhozyaistvennikh kultur po ikh vidam po regionam. // Gosstat Ukraini: Arkhiv. 2020. [URL:http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2020/sg/ovuzp sg/Arh_ovuzpsg_2020_u.html](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2020/sg/ovuzp sg/Arh_ovuzpsg_2020_u.html)
3. Klius S. V. Vyznachennia enerhetychnoho potentsialu solomy i roslynnykh vidkhodiv za period nezalezhnosti Ukrainy // Vidnovliuvana enerhetyka. 2012 №3. S. 71–79.
4. What a Waste: Global Review of Solid Waste Management // World Bank. Urban Development. 2012. No. 15. <http://hdl.handle.net/10986/17388>
5. Gutberlet J. Waste, poverty and recycling // Waste Management. 2010. Vol. 30, № 2. P. 171 – 173.
6. Zia H., Devadas V. Urban solid waste management in Kanpur: Opportunities and perspectives // Habital International. 2008. Vol. 32, № 1. P. 58 – 73.
7. Raizberg B.A., Starodubtseva B.B. Sovremennii ekonomicheskii slovar: Metodologicheskie ukazaniya // INFA, 1999. 479 s.
8. Mikhailova N.V., Feoktistov A.Yu. Termicheskaya pererabotka otkhodov v tsementnoi promishlennosti // Tverdie bitovie otkhodi. 2009. №2. - S. 30-34.
9. Upravlinnya ta povodzhennya z vidkhodami. Chastina 2. Tverdi pobutovi vidkhodi: navchalnii posibnik / Petruk V. G. ta in. Vinnitsya : VNTU. 2013. 243 s
10. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EE A relevance). Official Journal of European Union. 22.11.2008.- L 312/3-312/30.
11. Brunetkin, O., Maksymov, M., Brunetkin, V., Maksymov, O., Dobrynin, Y., Kuzmenko, V., Gultsov, P. Development of the model and the method for determining the

influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021, 4/1 (112), 41–53. [DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239150](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239150)

12. Брунеткін В.О. Давидов В.О., Тарахтій О.С. Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин з використанням рівноважної моделі // Вісник ХНТУ № 2(85), 2023 р <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.1>

13. Davydov V., **Brunetkin V.**, Lysiuk G. Solution of the Inverse Incorrectly Posed Problem by the Library Method. // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. Volume 12, Issue 1, pp. 97-103. [DOI:10.25673/115647; PPN 1884680704](https://doi.org/10.25673/115647; PPN 1884680704) (ISSN 2199-8876) (SCOPUS)

14. Brunetkin O., Beglov K., Brunetkin V., Maksymov O., Maksymova O., Havaliukh O., Demydenko V. Construction of a method for representing an approximation model of an object as a set of linear differential models // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020, 6(2 (108), 66–73. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.220326>

15. Брунеткін В.О., Давидов В.О., Тельпіс Р.Ф., Жанько К.О. Метод мінімізації втрати з димовими газами шляхом управління їх кількістю при змінному навантаженні котла // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація. 2024. С. 111–117. [DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/17](https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/17)

16. Брунеткін О. І., **Брунеткін В. О.** Визначення складу продуктів реакції термічної переробки органічних речовин довільного невідомого складу // IX Наукова конференція «НАУКОВІ ПІДСУМКИ 2020 РОКУ». Збірка наукових праць. – Харків, Х.: Технологічний Центр, 2020. – 70 с. <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/8214/1/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%81%D1%83%D0%BC%D0%BA%D0%B8%202020.pdf>

17. **Брунеткін В.О.** Схема комплексної піролітично-газифікаційної переробки непідготовлених органічних речовин // Тези доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції 84 «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»,

27–28 квітня 2021 р. Харків. <https://web.kpi.kharkov.ua/turbine/wp-content/uploads/sites/100/2021/10/Konferentsiya-tezisy-2021.pdf>

18. **Брунеткін В.О.** Комбінований шаровий газогенератор / В.О. Брунеткін, В.О. Давидов // The 22th International scientific and practical conference “Modern theories and improvement of world methods” (June 06–09, 2023) Helsinki, Finland. International Science Group. 2023. p. 440-443. [URL:https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22](https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22)

19. Heletukha H.H., Zhelezna T.A., Zhovmir M.M., Matvieiev Yu.B., Drozdova O.I. Otsinka enerhetychnoho potentsialu biomasy v Ukraini. Chastyna 1. Vidkhody silskoho hospodarstva ta derevynna biomasa. // Promyslova teplotekhnika. 2010. T. 32. №5. S. 58–65

20. Klius S. V. Vyznachennia enerhetychnoho potentsialu solomy i roslynnykh vidkhodiv za period nezalezhnosti Ukrainy. // Vidnovliuvana enerhetyka. 2012 №3. S. 71–79.

21. Cai, J., Wu, W., & Liu, R. Sensitivity analysis of three-parallel-DAEM-reaction model for describing rice straw pyrolysis // Bioresource Technology. 2013. 132, P.423–426. [DOI:10.1016/j.biortech.2012.12.07](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.07)

22. Maksymenko A. Pobudova na nechitkii lohitsi kompiuternoi systemy avtomatychnoho upravlinnia obiekto, shcho maie obmezheni obchysliuvalni y enerhetychni resursy // Naukovi pratsi Chornomorskoho derzhavnoho universytetu imeni Petra Mohyly kompleksu Kyievo-Mohylianska akademiia. Seriia: Kompiuterni tekhnolohii, 287(285) S. 83-88.

23. Kim, Daehwan. Physico-Chemical Conversion of Lignocellulose: Inhibitor Effects and Detoxification Strategies: A Mini Review // Molecules. 2018. V. 23.ed.2. P. 309. [DOI:10.3390/molecules23020309](https://doi.org/10.3390/molecules23020309).

24. Smuga-Kogut Małgorzata, Bychto Leszek, Walendzik Bartosz & Szymanowska-Powałowska Daria, Marecik Roman, Kobus-Cisowska Joanna, Grajek Katarzyna, Cielecka-Piontek, Judyta. Use of Buckwheat Straw to Produce Ethyl Alcohol Using Ionic Liquids // Energies. 2019, 12(10) [URL:https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/2014](https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/2014)

25. Neijat M.S., Gallagher J.R., Chemical composition and nutritive value of pea straw subjected to fungal fermentation // Trop. Anita. Hlth Prod, 1997, 4. P.216- 218

26. Teplo s polei. Ekonomika szhiganiya solomi // MM Dengi i Tekhnologii. 2001, Iyun.
27. Torben Skott. Proizvodstvo energii iz solomi // Polozhenie tekhnologii i innovatsii v Danii. 2011. [URL:https://saf.org.ua/wp-content/uploads/2011/04/straw-to-energy-dema](https://saf.org.ua/wp-content/uploads/2011/04/straw-to-energy-dema)
28. Lawrence Ricker N. Model predictive control with state estimation // Industrial & Engineering Chemistry Research .1990. №29 (3).P. 374-382, DOI: 10.1021/ie00099a013
29. Mathieu J.L., Koch S.and Callaway D.S. State Estimation and Control of Electric Loads to Manage Real-Time Energy Imbalance // IEEE Transactions on Power Systems. 2013.V.28, № 1, P. 430-440, Feb. DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2204074.
30. Shilkina S.V., Fokina Ye.N. Kontroller nechyotkoi logiki v upravlenii tekhnologicheskimi protsesami // Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobilno-dorozhnoi akademii. 2018. Vip.15 (1 (59)).
31. Labutin A.N., Nevinitzin V.Yu., Volkova G.V., Panasenkova A.V., Zaitsev V.A. Sintez kaskadnoi sistemi upravleniya teplovim rezhimom tekhnologicheskogo obekta metodami teorii sinergeticheskogo upravleniya // Vestnik IGEU.2019. Vip. 3 S. 41–48.
32. Biryulin Yu.S., Mikhalkin V.N. Termodinamicheskii Raschet Teploti Sgoraniya Uglevodorodov // Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobilno-dorozhnoi akademii. Vip.15 (1 (60)).
33. Tozlu A., Ozahi E., Abusoglu A. Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 54. P. 809 – 815.
34. Cheng Hu Y. Municipal solid waste as a renewable source of energy: Current and future practices in China // Bioresource Technology. 2010. Vol. 101, № 11. P. 3816 – 3824.
35. Sharholy M., Ahmad K., Vaishya R., Gupta R. Municipal solid waste characteristics and management in Allahabad, India // Waste Management. 2007. Vol. 27, № 4. P. 490 – 496
36. Ziadat A., Mott H. Assessing solid waste recycling opportunities for closed campuses // Management of Env Quality. 2005. Vol. 16, № 3. P. 250 – 256.

37. Ahmed A. Environmental Properties of Waste By Product Materials Used in Constructions // J solid waste techno mgmt. 2014. Vol. 40, № 2. P. 160 – 169.
38. Sister V.G., Mirnii A.N. Gyunter L.I. Ekologicheskie problemi megapolisov // Akad. kommun. khoz-va im. K.D. Pamfilova, 2004. 431 s.
39. Sopilko N.Yu. Pererabotka otkhodov: analiz mirovikh tendentsii // Tverdie bitovie otkhodi. 2011. №11. С. 42-44
40. Babanin I.V. Otkhodi v stranakh Yevropeiskogo soyuza: statistika i dinamika // Tverdie bitovie otkhodi. 2011. №6. S. 68-71.
<https://www.solidwaste.ru/magazine/archive/viewdoc/2011/6/1103.html>
41. Tverdi pobutovi vidkhodi v Ukraïni: Potentsial rozvitku. Stsenarii rozvitku galuzi povodzhennya z tverdimi pobutovimi vidkhodami: Pidsumkovii zvit // URL: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/504c5765-89d4-4be1-916e>
42. Mirnii A.N., Abramov N.F., Nikogosov Kh.N., Skvortsov L.S. i t.d. Sanitarnaya ochistka i uborka naselennikh mest: Spravochnik / pod red. A.N. Mirnogo. 2005. 383 s.
43. Petrov B.G., Gabaidullin A.G. i dr. Rekomendatsii po raschetu platezhei za prirodopolzovanie v Respublike Tatarstan // Ekspres – ZM. Kazan: «Tatpoligraf». 1998. 226 s.
44. Sister V.G., Mirnii A.N., Skvortsov L.S., Abramov N.F., Nikogosov Kh.N. Tverdie bitovie otkhodi (sbor, transport i obezvrezhivanie): Spravochnik // AKKh im. K.D. Panfilova. 2001.
45. E.Stengler. Waste-to-Energy Roadmap towards 2035 // URL: https://www.vivis.de/wp-content/uploads/WM9/2019_WM_001-014-Stengler.pdf
46. Klinkov A.S., Belyaev P.S. i dr. Utilizatsiya i vtorichnaya pererabotka polimernikh materialov: Uchebnoe posobie // Tambov: TGU. 2005. 80 s.s
47. Venikov V.A., Zhuravlyov V.G., Filippova G.A. Optimizatsiya rezhimov elektrostantsii i energosistem: ucheb. dlya vuzov // Energoizdat, 1981. 464 s.
48. Pletnyov G.P. Avtomatizirovannye sistemi upravleniya obektami teplovikh elektrostantsii // Izd-vo MEI, 1995. 353 s

49. V.Ya. Rotach, V.P. Zverkov i dr. Funktsii avtomatizirovannoi nastroiки v mikroprotsessornikh avtomaticheskikh sistemakh upravleniya – sostoyanie, perspektivi, podgotovka polzovatelei // Teploenergetika. 1993. M. S. 2–7.
50. Pelykh S.N., Maksimov M.V., Ryabchikov S.D. The prediction problems of VVER fuel element cladding failure theory // Nuclear Engineering and Design Volume 302, Part A, June 2016, Pages 46-55. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.04.005>.
51. Brunetkin A.I., Maksimov M.V. The method for determination of a combustible gas composition during its combustion // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. No.5, 2015, p.83-90,
52. Tanevski, J., Todorovski, L., Kalaidzidis, Y. et al. Domain-specific model selection for structural identification of the Rab5-Rab7 dynamics in endocytosis // BMC Syst Biol 9, 31 (2015). <https://doi.org/10.1186/s12918-015-0175-x>
53. Spieler D., Mai J., Craig J.R., Tolson B.A., & Schütze N. Automatic model structure identification for conceptual hydrologic models // Water Resources Research. 2020. 56, e2019WR027009. <https://doi.org/10.1029/2019WR027009>
54. Hieu D.V., Hai N. Q., Hung D. T. The Equivalent Linearization Method with a Weighted Averaging for Solving Undamped Nonlinear Oscillators // Journal of Applied Mathematics, Volume 2018, Article ID 7487851, 15 pages, <https://doi.org/10.1155/2018/7487851>
55. Bartosiewicz Z., Kotta Ü., Tönso M., Wyrwas M. Static state feedback linearization of nonlinear control systems on homogeneous time scales // Mathematics of Control, Signals, and Systems. 2015, Volume 27, Issue 4, pp 523–550, <https://doi.org/10.1007/s00498-015-0150-5>
56. Zitek P., Fišer J. & Vyhlídal T. Dynamic similarity approach to control system design: delayed PID control loop // International Journal of Control. 2019. 92:2, 329-338, DOI:10.1080/00207179.2017.1354398
57. Balaguer P. Application of Dimensional Analysis in Systems Modeling and Control Design. 2013. 152 p. DOI:10.1049/PBCE090E.
58. Brunetkin O., Maksymova O., Trishyn F. Development of the method for reducing a model to the nondimensionalized form // Eastern-European Journal of

Enterprise Technologies. 2018, 3/4 (93), pp. 26-33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132562>

59. Leniowska L., Sierżęga M. Vibration control of a circular plate using parametric controller with phase shift adjustment // *Mechatronics*, Volume 58, 2019, P. 39-46.

60. Zhu Y., Hou Z. Controller dynamic linearisation-based model-free adaptive control framework for a class of non-linear system // *IET Control Theory & Applications*, Volume 9, Issue 7, 2015, p. 1162 – 1172.

DOI:10.1049/iet-cta.2014.0743, Print ISSN 1751-8644, Online ISSN 1751-8652

61. Tabatabaei M., Barati-Boldaji R. (). Non-overshooting PD and PID controllers design // *Automatika*. 2017. 58:4, 400-409. DOI:10.1080/00051144.2018.1471824

62. Fernández M., Conde B., Eguía P., Granada E. Parameter identification of a Round-Robin test box model using a deterministic and probabilistic methodology // *Journal of Building Performance Simulation*. 2018. 11:6, 623–638, DOI:10.1080/19401493.2017.1420824

63. Yang X., Gao J., Shardt Y.A.W., Li L., Tong C. Parameter Identification and Control Scheme for Monitoring Automatic Thickness Control System with Measurement Delay // *Journal of Control Science and Engineering*. 2017. vol. 2017, Article ID 1952594, 11 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1952594>

64. Gitelman L.D., Ratnikov B.E. *Energeticheskii biznes: ucheb. Posobie* // Delo. 2006. 600 s

65. Sabanin V.P., Kormilitsyn V.I., Kostyk V.I., Smirnov N.I., Koroteev A.V., Repin A.I. Load control and the provision of the efficiency of steam boilers equipped with an extremal governor // *Thermal Engineering*. 2014. T. 61. № 12. С. 905–910.

66. Kazarinov L.S. , Shnaider D.A. , Kinash A.V., Kolesnikova O.V. Korrelyatsionno-ekstremalnaya sistema upravleniya energeticheskoi effektivnostyu parovikh kotlov // *Vestnik YuUrGU*. 2010. № 2. S. 81–85.

67. Zhuravlev A.A., Shit M.L., Poponova O.B., Shit B.M. Sintez i analiz zakonov upravleniya sistemoi regulirovaniya urovnya v barabane gazomazutnogo parovogo kotla s uchetom ekonomii energoresursov // *Problemi regionalnoi energetiki*. 2005. № 1. S. 43–52.

68. Akolzin A.N. Sistema avtomaticheskogo upravleniya vodonagrevatel'nyim kotlom // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013. № 5 (142).
69. Yeremin Ye.L., Telichenko D.A. Avtomatizirovannaya sistema regulirovaniya raskhoda topliva na TETs // Informatika i sistemi upravleniya. 2011. № 2 (38). S. 157–168
70. Medvedev A.E., Volikov K.P. Avtomaticheskoe upravlenie tyagodutevim traktom v odogreivnogo ugol'nogo kotla // Vestnik KuzbGTU. 2009. № 6. S. 49–52.
71. Bogdanov A.V. Sistema upravleniya parovym kotlom na osnove mnogomernogo chetkogo logicheskogo regul'yatora // Nauchno-tekhnich. vestnik Povolzhya. 2011. № 6. S. 108–115
72. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya urovnya vodi v barabane kotla: pat. 159833: MPK F22B35/00 / Ye.L. Yeremin, D.A. Telichenko; Zayavitel' i patentoobladatel': Amurskii gosudarstvennii universitet, Blagoveshchensk – zayavl. 29.06.2015.
73. Shkarovskii A.L. , Novikov O.N. , Novikova A.V., Polushkin V.I. Razrabotka novogo semeistva intellektual'nykh sistem upravleniya kachestvom szhiganiya topliva // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2016. № 12-3. S. 556– 561.
74. Zemtsov N.S. , Frantsuzova G.A. Sintez PID-regulyatora dlya sistemi upravleniya pryamotokhnym kotlom // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2015. № 9. T. 16. S. 631–636.
75. Sabanin V.R. , Starostin A.A., Repin A.I., Popov A.I. Study of connected system of automatic control of load and operation efficiency of a steam boiler with extremal controller on a simulation model // Thermal Engineering. 2017. T. 64. № 2. C. 151–160.
76. Kazarinov L.S., Ignatova T.A., Kinash A.V., Kolesnikova O.V. , Shnaider D.A. Operativnoe regulirovanie ekonomichnosti goreniya v energeticheskikh kotlakh // Vestnik YuUrGU. 2008. № 17. S. 21–23.
77. Belavkin I.V., Kazarinov L.S. Optimizatsiya rezhimov energeticheskikh kotlov pri szhiganii VER // Vestnik YuUrGU. 2013. № 2, T.13. S. 25–31.
78. Kazarinov L.S., Kinash A.V., Zozulya A.I. Mnogosvyaznaya sistema optimal'nogo regulirovaniya ekonomichnosti potrebleniya topliva // Vestnik YuUrGU. 2011. № 2. S. 64–69.

79. Finaev V.I., Beloglazov D.A. , Pavlenko Ye.N., Shadrina V.V. Sistema avtomaticheskoi optimizatsii v usloviyakh nepolnoti dannikh na primere barabannogo kotla. Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta // Tekhnicheskie nauki. 2014. № 11 (160). S. 227–234.

80. Kanyuk G.I., Mezerya A.Yu. , Laptinova Ye.V. Model energeticheskikh poter v kotle teplovikh elektrostantsii i vozmozhnie puti ikh minimizatsii // Adaptivni sistemi avtomatichnogo upravlinnya. 2015. № 2 (27). S. 79–82.

81. Stepanets A.V., Koropova L.A. Audit kachestva raboti algoritmov upravleniya barabannikh parovikh kotlov na stadii proektirovaniya sistemi avtomatizatsii // Tekhnologicheskii audit i rezervi proizvodstva. 2015. № 2 (23). T. 3. S. 8–12.

82. Ilin I.V., Mashkin A.N., Simin V.V., Uvarov Ye.A., Rubakhin V.E. Sovershenstvovanie avtomatizirovannoi sistemi upravleniya i kontrolya parovogo kotla, rabotayushchego pod davleniem // Bezopasnost truda v promishlennosti. 2015. № 10. S. 86–89.

83. Kozhevnikova N.Yu., Fomin V.Yu., Khasanov A.R. Optimizatsiya sistem upravleniya parovimi kotlami na teploelektrostantsiyakh // Novoe slovo v nauke: perspektivi razvitiya. 2015. № 4 (6). S. 151–153.

84. Konopatskii Yu.V. Optimizatsiya parametrov sistemi upravleniya kotloagregata metodom polnogo perebora. Informatsionnie tekhnologii v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh zadachakh // materialy mizhn. nauk.-prakt. konf., Penza, 24-25 marta. 2016. S. 192–194.

85. Volkov I.S. Matematicheskaya model turbonadduvochnogo agregata parovogo kotla // Sistemi upravleniya i obrabotki informatsii. 2017. № 2 (37). S. 9–23.

86. Kovrigo Yu.M. , Bagan T.G., Bunke A.S. Securing robust control in systems for closed-loop control of inertial thermal power facilities // Thermal Engineering. 2014. Vol. 61. № 3. P. 183–188.

87. Borisov G.B. Analiz sovremennikh sistem avtomatizatsii kotelnikh // Teploenergetika. 2010. №6. S. 2–11.

88. Zrazhevskii R.A., Konovalov V.I., Kurganov V.V., Burmantov D.G. Modelirovnie tsifrovikh regulyatorov urovnya v barabane parovogo kotla // Vestnik nauki Sibiri. 2011. № 1(1). S. 344–348.

89. Bogdanov A.V. Programmnaya realizatsiya nechetkogo regulyatora v sisteme upravleniya parovogo kotla TES dlya adaptatsii PID-regulyatora // Sovremennye problemi nauki i obrazovaniya. 2015. № 2-2. S. 182–189.

90. Kulakov G.T., Gorelisheva M.L. Kompleksnaya metodika optimizatsii parametrov dinamicheskoi nastroiки regulyatorov vpriskov // Energetika. Izvestiya visshikh uchebnikh zavedenii i energeticheskikh obedinenii SNG. 2009. № 3. S. 59–66.

91. Kulakov G.T., Gorelisheva M.L. Issledovanie vliyaniya otnositelnoi postoyannoi vremeni inertsiionnogo uchastka paroperegervatelya na kachestvo para za kotlom v shirokom diapazone izmeneniya nagruzok // Energetika. Izvestiya visshikh uchebnikh zavedenii i energeticheskikh obedinenii SNG. – 2008. – №5. – S. 53–60.

92. Zhuravlev A.A., Shit M.L., Poponova O.B., Shit B.M. Proektirovanie zakona upravleniya sistemoi regulirovaniya podachi topliva parovogo kotla s uchetom trebovaniy ekonomii energoresursov pri upravlenii // Problemi regionalnoi energetiki. 2005. № 1. S. 34–42.

93. Yeremin Ye.L. i dr. Upravlenie tekhnicheskimi sistemami v usloviyakh neopredelennosti: monografiya. // Blagoveshchensk: Amurskii gos. un-t, 2014. 211 s.

94. Katin V.D., Kolmogorov A.N., Kozhin N.A. Puti ratsionalnogo ispolzovaniya topliva i vtorichnykh energeticheskikh resursov v tekhnologicheskikh pechakh NPZ // Neftepererabotka i neftekhimiya : NTIS. – M.: TsNIITE Neftekhim. 1994. № 6. S. 34–36.

95. Eshenko A.A. Problemi avtonomnogo upravleniya v sisteme regulirovaniya urovnya v barabane i davleniya para v kotle // Vestnik IrGTU. 2012. № 5 (64). S. 158–162.

96. Avdeeva O.V. Sistema ekstremalnogo regulirovaniya goreniem topliva v kotelnoi ustanovke // Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 3 (11). S. 167–174.

97. Luzin P.A., Dunaev M.P. Regulirovanie temperaturi peregretoго para kotelnogo agregata // Vestnik IrGTU. 2016. № 5 (112). – S. 120–128.

98. Shulgin S.K., Yurkov V.A., Sinepolskii D.O. Sistema gibridnogo parallelnogo neiroupravleniya temperaturai peregretoho para v kotloagregate. «Novie zadachi tekhnicheskikh nauk i puti ikh resheniya» // materialy mizhn. nauk.-prakt. konf.. Perm, 10 noyabrya 2016. S. 193–196.
99. Pavlenko Ye.N. Formalizatsiya funktsionirovaniya parovikh kotlov na osnove tekhnologicheskoi skhemi // Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2008. № 7(84). S. 206–213.
100. Klishin V.A., Shvetsov P.V., Khutornoi N.V., Koshelev A.E. Sistema avtomaticheskogo upravleniya i regulirovaniya kotlom № 1 parovozdukhoduvnoi stantsii OAO "ZSMK" // Promishlennye ASU i kontrolleri. 2007. № 1. S. 10–13.
101. Pavlenko Ye.N. Osobennosti upravleniya i modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov v parovikh kotlakh v usloviyakh neopredelennosti // Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2008. №4(81). S. 184–188.
102. Rousta K., Ekström K.M. Assessing incorrect household waste sorting in a medium-sized Swedish city // Sustainability 2013, 5, 4349–4361.
<https://doi.org/10.3390/su5104349>
103. Newspaper website Spiegel «Nur 16 Prozent des Plastikmülls werden wiederverwendet» <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/plastikmuell-nur-16-prozent-werden-in-deutschland-wiederverwendet-a-1271125.html>
104. Seltenrich N. Emerging Waste-to-Energy Technologies: Solid Waste Solution or Dead End? // Environmental Health Perspectives, 2016, [Vol. 124, No. 6](https://doi.org/10.1289/ehp.124-A106).
<https://doi.org/10.1289/ehp.124-A106>
105. Alemasov V., Glushko V. Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products = Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoistva produktov sgoraniya // translated from Russian [by R. Kondor, and Ch. Nisenbaum], Jerusalem : Israel Program for Scientific Translations, 1974-1976.
<https://searchworks.stanford.edu/view/892711>
106. Kogler M., Köock E.-M., Klötzer B., Schachinger T., Wallisch W., Henn R., Huck C.H., Hejny C., Penner, C. High-temperature carbon deposition on oxide surfaces by

CO disproportionation // J. Phys. Chem. 2016, C 3(120), 1795–1807.

<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b12210>

107. Котов В.Г., Святенко А.М., Ховавко О.І. Небесний О.О., Філоненко Д.С. Термодинаміка процесу утворення сажі при високій концентрації водню у газі, що містить монооксид вуглецю // Енерготехнології та ресурсозбереження. 2014, № 1., С. 38-43. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/127270>

108. 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. River Publishers. 2021, P. 397–434. ISBN: 9788770223416. DOI: [10.1201/9781003337010](https://doi.org/10.1201/9781003337010)

109. Leibbrandt N.H., Aboyade A.O., Knoetze J.H., Görgens J.F. Process efficiency of biofuel production via gasification and Fischer–Tropsch synthesis // Fuel. 109, 2013, Pages 484-492. doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.013

110. Matsevityi Yu.M., Alekhina S.V., Borukhov V.T., Zayats G.M., Kostikov A.O. Identification of the Thermal Conductivity Coefficient for Quasi-Stationary Two-Dimensional Heat Conduction Equations. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – V. 90, No.6. – С. 1295-1310, [DOI 10.1007/s10891-017-1686-7](https://doi.org/10.1007/s10891-017-1686-7)

111. Установка для 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., Лисюк О.В., Тарахтій О.С. № а 2017 12785; заявл. 22.12.2017; опубл. 11.06.2018, Бюл. №11.

112. Cao Y., Bai Y., Du J. Air-steam gasification of biomass based on a multi-composition multi-step kinetic model: A clean strategy for hydrogen-enriched syngas production // Science of The Total Environment. 2021, V. 753, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141690>.

113. Trojan M. Modeling of a steam boiler operation using the boiler nonlinear mathematical model // Energy, Volume 175, 2019, P. 1194-1208. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.160>

114. Iannino V., Colla V., Innocenti M., A. Signorini. Design of a H_{∞} Robust Controller with μ -Analysis for Steam Turbine Power Generation Applications // *Energies*. 2017, 10(7), 1026; <https://doi.org/10.3390/en10071026>
115. Brunetkin O., Beglov K., Maksymov M., Baskakov V., Vataman V., Kryvda V. Designing an automated control system for changing NPU energy release compensating for arising internal disturbing factors based on their approximation model // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022, 3(2 (117), 63–75. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.258394>
116. Eckert M. Pipe flow: a gateway to turbulence // *Arch. Hist. Exact Sci.* **75**, 249–282 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00407-020-00263-y>
117. Saeid, N.H., Seetharamu, K.N. Finite element analysis for co-current and counter-current parallel flow three-fluid heat exchanger // *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2006, Vol. 16 No. 3, pp. 324-337. <https://doi.org/10.1108/09615530610649744>
118. 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. – №3/6 (99). pp. 22–30. doi: 10.15587/1729–4061.2019.169219
119. Duty C., Johnson R. (et al.) Heat and mass-transfer modeling of an angled gas-jet LCVD system. // *Applied Physics A*, Springer, - 2003, -vol. 0, No 5, - P. 697-705. <https://doi.org/10.1007/s00339-002-1887-5>
120. Rodi W. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 6* // Elsevier, 2005. – 1012 p. [10.1016/B978-0-08-044544-1.X5000-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044544-1.X5000-6)
121. Гавриленко Б.В., Неежмаков С.В. Математическая модель топки кипящего слоя шахтного автономного воздухоподогревателя в нестационарных условиях // *Проблемы эксплуатации оборудования шахтных установок: сборник научных трудов*. – 2005. – с. 297 – 304.
122. Гавриленко Б.В. Неежмаков С.В. Синтез математической модели топки кипящего слоя шахтного воздухоподогревателя при нестационарных условиях для задач автоматического управления // *Моделювання та інформаційні технології*: Зб.

наук. пр. — К.: ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України, 2010. — Вип. 57. — С. 164-173.
<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/21932>

123. Lysyuk A.V., Bondarenko A.V., Maksimov M.M., Brunetkin A.I. A model and method of combustion in a thermal power plant of a variable composition hydrocarbon gas // Automation of technological and business processes. – Odessa, 2017. – Volume 9, Issue 2. – С. 21 – 27.

124. Davydov V.O., Bondarenko A.V. Method for calculating the combustion temperature of an arbitrary mixture of gaseous hydrocarbon fuel with an arbitrary excess of air // Praci Odesskogo politechnicheskogo universitetu. Odessa, 2013. - №3 (42) — С. 98 — 102

125. Hanchate N. Biomass gasification using dual fluidized bed gasification systems: A review [Text] / N. Hanchate, S. Ramani, C.S. Mathpati, V. H. Dalvi //, Journal of Cleaner Production, Volume 280, Part 1, 2021, 123148, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123148>

126. Самилін, О.О., Цивенкова, Н.М., Голубенко А.А. Сучасні енергоефективні технології використання відходів біомаси в сільському, лісовому та комунальному господарствах // Вісник ЖНАЕУ № 1, 2009, с. 269-278

127. Ткаченко С.Й., Боднар Л.А., Юзюк А.О. Перспективні напрямки використання біомаси як джерела енергії // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2011. № 2, с. 68-73.
<https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1396/1396>

128. Kurkela E. Review of Finnish biomass gasification technologies // 2023.
https://www.researchgate.net/publication/30482338_Review_of_Finnish_biomass_gasification_technologies

129. Sarkar S., Kumar A., Sultana A. Biofuels and biochemicals production from forest biomass in Western Canada // Energy. Volume 36, Issue 10, 2011, Pages 6251-6262. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.024>

130. Сайт компанії CHOREN. <https://www.choren.com/en/technology/choren-coal-gasification/>

131. Bureika G., Matijošius J., Rimkus A. Alternative Carbonless Fuels for Internal Combustion Engines of Vehicles // Ecology in Transport: Problems and Solutions. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 124. 2020. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42323-0_1

132. Couto N., Rouboa A., Silva V., Monteiro E., Bouziane K. Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas // Energy Procedia, Volume 36, 2013, P. 596-606. ISSN 1876-6102 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.068>

133. Lyons Cerón A., Konist A., Lees H., Järvik O. Effect of Woody Biomass Gasification Process Conditions on the Composition of the Producer Gas // Special Issue Selected Papers from the 9th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES2021), *Sustainability* **2021**, 13(21), 11763 <https://doi.org/10.3390/su132111763>

134. Soroka, B., & Horupa, V. (2017). Analysis of the process of water vapor condensation within gas atmospheres and combustion products // Energy Technologies & Resource Saving, 2017, (1), 3-18. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2017.01>

135. Брунеткин, А.И., Максимов, М.В. Метод определения состава горючих газов при их сжигании // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2015. – №5. – С. 83–90. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2015_5_16

ДОДАТОК А

Документи про впровадження результатів дослідження



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
Брунеткіна Володимира Олександровича
представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Брунеткіна В. О. «Підвищення переробки органічних відходів довільного складу за рахунок автоматичного керування подачі сировини» 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;
- Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів;
- Динаміка теплових процесів;
- Моделювання теплоенергетичного обладнання в АСУ.

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Перший проректор



Сергій НЕСТЕРЕНКО

Вик. Максимов М.В.
тел. 705-83-71



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
 Брунеткіна Володимира Олександровича
 представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Надана довідка затверджує, що дисертаційне дослідження Брунеткіна В.О. «Підвищення переробки органічних відходів довільного складу за рахунок автоматичного керування подачі сировини» виконане відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, і є складовою частиною держбюджетних НДР за темами: «Підвищення ефективності комп'ютерно-інтегрованих систем управління (КІСУ) за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів», НДР № 235-47, (№0123U102484) і «Розробка моделі і методу ефективного керування експлуатацією енергоустановок від поновлюваних джерел енергії для забезпечення балансу енергосистеми» НДР № 205-55 (№0122U000565).

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Проректор



Вик. Максимов М. В.
 тел. 705-83-71

Дмитро ДМИТРИШИН

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Brunetkin O., Beglov K., **Brunetkin V.**, Maksymov O., Maksymova O., Havaliukh O., Demydenko V. Construction of a method for representing an approximation model of an object as a set of linear differential models // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. 6/2 (108), 66–73. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.220326> (SCOPUS)

2. Brunetkin O., Maksymov M., **Brunetkin V.**, Maksymov O., Dobrynin Y., Kuzmenko V., Gultsov P. Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 4/1 (112), 41–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239150> (SCOPUS)

3. **Брунеткін В.О.**, Давидов В.О., Тарахтій О.С. Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин з використанням рівноважної моделі // [Вісник Херсонського національного технічного університету](#) / інженерні науки. 2023. 2(85), 9–19. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.1>

4. **Брунеткін В.О.**, Давидов В.О., Тельпіс Р.Ф., Жанько К.О. Метод мінімізації втрати з димовими газами шляхом управління їх кількістю при змінному навантаженні котла. // Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35 (74), №1, 111–117. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/17>

5. Davydov V., **Brunetkin V.**, Lysiuk G. Solution of the Inverse Incorrectly Posed Problem by the Library Method. // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. Volume 12, Issue 1, pp. 97-103. DOI:10.25673/115647; PPN [1884680704](#) (ISSN 2199-8876) (SCOPUS)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. **Брунеткін В.О.** Комбінований шаровий газогенератор / В.О. Брунеткін, В.О. Давидов // The 22th International scientific and practical conference “Modern theories

and improvement of world methods” (June 06–09, 2023) Helsinki, Finland. International Science Group. 2023. p. 440-443. [URL:https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22](https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22)

7. **Брунеткін В.О.** Схема комплексної піролітично-газифікаційної переробки невідготовлених органічних речовин // Тези доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції 84 «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», 27–28 квітня 2021 р. Харків.

<https://web.kpi.kharkov.ua/turbine/wp-content/uploads/sites/100/2021/10/Konferentsiya-tezisy-2021.pdf>

8. Брунеткін О. І., **Брунеткін В. О.** Визначення складу продуктів реакції термічної переробки органічних речовин довільного невідомого складу // IX Наукова конференція «НАУКОВІ ПІДСУМКИ 2020 РОКУ». Збірка наукових праць.

– Харків, Х.: Технологічний Центр, 2020. – 70 с.

<https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/8214/1/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%81%D1%83%D0%BC%D0%BA%D0%B8%202020.pdf>