

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

БУТЕНКО ОЛЕКСАНДР ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 681.516.77; 681.518

ДИСЕРТАЦІЯ

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ
ПРОЛІЗУ НА ОСНОВІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СКЛАДУ ТВЕРДИХ
ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ**

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



О. В. Бутенко

Науковий керівник Беглов К.В., кандидат технічних наук, доцент

Одеса – 2021

АНОТАЦІЯ

Бутенко О. В. Автоматизована система керування установкою піролізу на основі ідентифікації складу твердих побутових відходів. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Державний університет «Одеська політехніка» МОН України, Одеса, 2021.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню моделей і методів автоматизованої системи керування установкою піролізу для термічної утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) за рахунок ідентифікації їх складу при нададіабатичному розкладанні для отримання продукт-газу максимальної теплотвірної здатності. Це стає можливим шляхом виконання оберненого і некоректно поставленого завдання пошуку найкращого рішення складу продукт-газу при термічній утилізації ТПВ.

У першому розділі «Аналіз стану питання утилізації ТПВ як об'єкта керування»:

– проведено аналіз світового досвіду, який показав, що найдоступнішим і економічно доцільним способом утилізації ТПВ є технології різноманітної термічної обробки. Альтернативою спалюванню ТПВ вважається автоматично керований процес двостадійного піролізу з подальшим використанням отриманих речовин в енергетичному устаткуванні. Об'єднання технології піролізу, побудованої на основі методу газифікації в нададіабатичному режимі, з методом визначення в режимі реального часу складу продукт-газу створює можливість автоматизувати процес переробки ТПВ. Наразі немає єдиного методу автоматизованого керування процесом термічної утилізації ТПВ невідомого складу. Для цього потрібно розраховувати ентальпію і визначати бруutto-формулу. Така задача є зворотною і некоректно поставленою.

Гострота і важливість вирішення такої задачі визначається тим, що на сьогодні відсутнє її розв'язання на науковому рівні. Водночас практично відсутні моделі та методи, які дають можливість створити автоматизовану систему керування установкою піролізу для термічної утилізації ТПВ довільного складу;

- показано, що існуючий критерій оцінки енергоефективності термічної переробки ТПВ дозволяє класифікувати установки на утилізаційні й на ті, що мають можливість виробляти теплову або електричну енергію для споживача;

- показано методи й засоби підвищення ефективності АСК при управлінні енерготехнологічними процесами переробки ТПВ та продемонстровано перспективність використання автоматичних систем керування та управління для утилізаційних технологічних установок на базі піролізу, які дозволять використовувати ТПВ довільного складу;

- обґрунтовано структуру й сформульовано завдання дисертаційного дослідження, яке полягає в розробці методу вирішення зворотної й некоректно поставленої задачі, що зробить можливим визначення брутто-формули речовини та використання відомих методів керування в автоматичному регуляторі. Склад сировини може багаторазово випадково змінюватися, що характерно для синтез-газу, отриманого при термічній переробці ТПВ. Тому це робить необхідним розробку нового методу розв'язання оберненої і некоректно поставленої задачі для розв'язання завдання автоматизованого керування процесом піролізу ТПВ.

У другому розділі «Імітаційна модель ТПВ як об'єкта керування» у ході виконання першого завдання дослідження отримано такі результати:

- розроблено метод моделювання складу ТПВ за якісним складом елементів та проведено імітаційне моделювання різних груп ТПВ в модельному уявленні їх умовною формулою. Метод дав змогу провести ідентифікацію ТПВ, що дозволило розробити основні технологічні прийоми процесу термічної переробки за рахунок використання технології піролізу. В основу методу покладено закони збереження речовини і балансу максимальних валентностей

окислювальних і відновлювальних елементів, хімічної кінетики, що дало змогу розрахувати граничну теплотвірну здатність сумішей органічних речовин;

- розроблено та обґрунтовано імітаційну модель ТПВ, основою якої є метод обчислення умовної формули, що дозволило ввести класифікаційні ознаки для ТПВ, яке термічно утилізуються за допомогою технології перолізу;

- під час розв’язання реальних технологічних завдань з автоматизації процесу піролізу було розроблено технологічну схему термічної переробки ТПВ установкою піролізу в адіабатичному потоці при фільтраційному горінні.

У третьому розділі «Метод бібліотеки для визначення складу продуктів піролізу ТПВ» для виконання другого завдання дослідження отримано такі результати:

- під час досліджень визначено загальний тип задачі як зворотно некоректно поставленої й виділено більш вузький її клас — складна задача інтерпретації. Для виконання даного завдання обрано метод бібліотеки;

- знайдено спосіб заповнення бібліотеки розв’язками прямої задачі у вигляді робочого тривимірного масиву. Для цього запропоновано два методи. Перший – перетворення коефіцієнта надлишку окиснювача α як вихідного даного для прямої задачі, де одержана величина використовується в якості вимірюваного технологічного параметра при вирішенні зворотної задачі визначення складу палива. Другий – перетворення вихідних даних прямої задачі в число-згортку (кількість атомів хімічних елементів в брутто-формулою й ентальпії палива), яке формується на основі позиційного принципу запису десяткових чисел;

- розроблено метод пошуку розв’язання складної задачі інтерпретації з даних, які отримані зі сформованого робочого тривимірного масиву шляхом застосування обмежень і послідовного виділення областей збігу даних;

- показана відсутність похибок, що вносяться при розв’язанні запропонованим методом. При моделюванні точних технологічних вимірів розрахункові похибки зумовлені тільки дискретизацією вихідних даних при

розв'язанні прямої задачі та визначено вплив точності вимірювань технологічних параметрів на похибку визначення складу пального.

У четвертому розділі «Система автоматичного керування установкою піролізу для термічної переробки ТПВ» досягнуто мети дисертаційного дослідження, а саме:

- отримано імітаційну модель об'єкта керування установкою піролізу при нададіабатичному режимі його проведення, що дозволяє розрахувати склад продукт-газу з максимальною теплотвірною здатністю при мінімальній кількості вуглистого залишку за будь-якого складу ТПВ. Максимальна теплотвірна здатність продукт-газу зумовлена тільки процесом переробки ТПВ в нададіабатичному режимі з можливим мінімально регульованим використанням повітря як окиснювача;

- визначено можливість існування рішень моделі об'єкта керування з енергетичного балансу. Отримане співвідношення енергії, зосередженої в продуктах реакції, що необхідно для підтримки процесу піролізу, забезпечує можливість організації процесу без повітря. Мінімальна кількість додаткового повітря або висока вологість ТПВ забезпечують максимальну теплотвірну здатність продукт-газу, що утворюється;

- розроблено метод автоматизованого керування піролізом ТПВ для забезпечення заданої витрати продукт-газу при нанесенні збурень витратою продукт-газу, складом і вологістю вихідного ТПВ;

- синтезовано імітаційну модель автоматизованої системи керування піролізною установкою, що дозволяє стабілізувати технологічний процес отримання продукт-газу на заданих технологічних значеннях. В об'єкті керування регульованими параметрами є: рівень рідини в газгольдері; витрата продукт-газу; температура протікання піролізу (продукт-газу); склад продукт-газу. Керуючими впливами є: витрата ТПВ; витрата повітря; витрата рециркуляції продукт-газу. Зовнішніми збуреннями на об'єкт є: задана витрата продукт-газу і склад ТПВ.

Ключові слова: САК, ТПВ, піроліз, ідентифікація, продукт-газ, енергетичний баланс, метод бібліотеки, складна задача інтерпретації.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертаційного дослідження :

1. Brunetkin O., Davydov V., Butenko O., Lysiuk G., Bondarenko A. Determining the composition of burned gas using the method of constraints as a problem of model interpretation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3/6 (99). P. 22–30. (SCOPUS).

2. Maksymov M. V., Brunetkin O. I., Beglov K.V., Alyokhina S.V., Butenko O.V. Automatic Control for the Slow Pyrolysis of Organic Materials with Variable Composition. *Advanced Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics River Publishers*. 2021. Chapter 14. P. 397-430. ISBN:978-87-7022-341-6 (Hardback), ISBN:978-87-7022-340-9 (Ebook) (SCOPUS)

3. Бутенко О.В., Максимов М.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І. Метод пошуку розв’язання складної задачі інтерпретації для розв’язання зворотної задачі з визначення складу пального. *Суднові енергетичні установки*. Науково-технічний збірник. Одеса. №39. 2019. С. (30–42)

4. Максимов М. В., Демиденко В. Е., Бутенко О. В., Брунеткін О. І. Модель піролізу органічних речовин змінного складу. *Інтегровані технології та енергозбереження*. №3. 2020. С. (12-24), DOI: 10.20998/2078-5364.2020.3.02

5. Максимов М. В., Демиденко В. Е., Бутенко О. В., Брунеткін О. І. Визначення складу палива для збройних сил України методом бібліотеки. *Збірник наукових праць НДЦ ЗСУ «Державний океанаріум» Інституту ВМС НУ «Одеська морська академія»*. №1(3). 2020 С. 102-110

6. Бутенко О.В., Ларіонова О.С. Імітаційна модель твердих побутових відходів як об'єкта керування. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія Технічні науки*. том 32 (71), № 2. 2021. С. 92-105.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. Бутенко А.В., Демиденко В.Е., Максимов М.М., Максимова О.Б. Разработка метода определения целевой функции оптимизации энергетической установки. *Modern scientific challenges and trends: a collection scientific works of the International scientific conference.*, Warsaw, Poland, 20th October, 2018. Warsaw. 2018. Issue. 9. P.128-133.

2. Butenko A.V., Demidenko V.E., Maksymova O.B. Development of the control system data ware and software for a heat supply variable structure system. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine: a collection scientific works of the International scientific and practical conference.*, Wloclawek, Republic of Poland, December 21-22, 2018. / Wloclawek. 2018. P.67 – 71.

3. Бутенко А.В., Демиденко Э.В., Брунеткин А.И. Метод идентификации состава газообразного горючего. *Сучасні тенденції розвитку науки: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції*, 17–18 березня 2018 р. (частина II). Київ. МНЦД. С. 39-40,

4. Бутенко О.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І Метод ідентифікації складу газоподібного пального. *Перспективні напрямки наукової думки: матеріали міжнародної науковопрактичної конференції*, 18 квітня 2018 р. Том 5. Тернопіль. ГО «Європейська наукова платформа» С. 63-69.

5. Бутенко О.В., Демиденко В.Е., Бондаренко В.В., Брунеткін О.І Модель і метод визначення витрати продуктів згорання газів природного і штучного походження. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП_18_2018)*: матеріали XVIII міжнародної науковотехнічної конференції 8–13 червня 2018 р. Одеса (Затока). С. 56-59.

6. Бутенко А.В., Демиденко В.Э., Брунеткін О.І. Разработка метода моделирования технических систем. *Science: discoveries and progress: Proceedings of articles the III International scientific conference. Czech Republic. Karlovy Vary . 2018, April, 28-29 / Editors prof. A.B. Belinskaya.*

ABSTRACT

Butenko O. Automated control system for pyrolysis plant based on identification of solid waste composition. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 - automation and computer-integrated technologies. - Odessa Polytechnic State University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2021.

The dissertation is devoted to the improvement of models and methods of the automated control system of the pyrolysis plant for thermal utilization of solid household waste (SHW), due to the identification of their composition during superadiabatic decomposition to obtain the product gas of maximum calorific value. This is made possible by solving the inverse and incorrectly set task of finding the best solution for the composition of the product-gas in the thermal utilization of SHW.

In the first section "Analysis of the state of SHW disposal as an object of management":

- the analysis of the world experience which has shown that the most accessible and economically expedient way of utilization of SHW is technologies of various thermal treatment. An alternative method of combustion of SHW is an automatically controlled process of two-stage pyrolysis with subsequent use of the obtained substances in power equipment. The combination of pyrolysis technology, built on the basis of the method of gasification in the superadiabatic mode, with the method of determining in real time the composition of the product-gas creates an opportunity to automate the process of SHW processing. Currently, there is no single method of automated control of the process of thermal utilization of SHW of unknown

composition. To do this, you need to calculate the enthalpy and determine the gross formula. This task is reversible and incorrectly set.

The urgency and importance of solving such problem is determined by the fact that today there is no solution at the scientific level. At the same time, there are almost no models and methods that make it possible to create an automated control system for the pyrolysis plant for thermal utilization of SHW of any composition.

- it is shown that the existing criterion for assessing the energy efficiency of thermal processing of SHW allows to classify plants for utilization and those that have the ability to produce heat or electricity for the consumer;

- methods and means of increasing the efficiency of ACS in the management of energy processes of SHW processing are shown and the prospects of using automatic control and management systems for utilization technological plants based on pyrolysis, which will allow the use of SHW of any composition.

- substantiated the structure and formulated the task of dissertation research, which is to develop a method for solving the inverse and incorrectly set task, which will make it possible to determine the gross formula of the substance and use known control methods in the automatic controller. The composition of the raw material can change many times by chance, which is typical for synthesis gas obtained by thermal processing of SHW. Therefore, it is necessary to develop a new method of solving the inverse and incorrectly set task to solve the problem of automated control of the process of pyrolysis of SHW.

In the second section "Simulation model of SHW as a control object" to solve the first problem of the study obtained the following results:

- the method of modeling of structure of SHW on qualitative composition of elements is developed and the simulation modeling of various groups of SHW in model representation by their conditional formula is carried out. The method made it possible to identify SHW, which allowed to develop the main technological methods of the thermal processing process through the use of pyrolysis technology. The method is based on the laws of conservation of matter and the balance of maximum valences of

oxidizing and reducing elements, chemical kinetics, which made it possible to calculate the maximum calorific value of mixtures of organic substances;

- developed and substantiated a simulation model of SHW, the basis of which is the method of calculating the conditional formula, which allowed to introduce classification features for solid waste, which is thermally utilized using pyrolysis technology;

- during the solution of real technological problems on automation of pyrolysis process, the technological scheme of thermal processing of SHW by pyrolysis installation in adiabatic stream at filtration combustion was developed.

In the third section "Library method for determining the composition of products of pyrolysis of SHW" to solve the second problem of the study obtained the following results:

- during the research the general type of the problem is defined as inversely incorrectly set and its narrower class is singled out - a difficult task of interpretation. To solve a certain problem, the library method is chosen;

- the solution of the problem of filling the library with solutions of the direct problem in the form of a working three-dimensional array is found, for this purpose two methods are offered. The first is the conversion of the excess oxidant coefficient α as the source data for the direct problem, where the obtained value is used as a measured technological parameter in solving the inverse problem of determining the fuel composition. The second conversion of the original data of the direct problem into a convolution number (the number of atoms of chemical elements in the gross formula and the enthalpy of fuel), which is formed on the basis of the positional principle of writing decimal numbers;

- the method of search of the decision of a difficult problem of interpretation from the data which are received from the generated working three-dimensional array by application of restrictions and consecutive allocation of areas of coincidence of data is developed.

- shows the absence of errors made in solving the proposed method. When modeling accurate technological measurements, the calculation errors are due only to the discretization of the initial data when solving the direct problem and the influence of the accuracy of measurements of technological parameters on the error in determining the fuel composition is determined.

In the fourth section "System of automatic control of the pyrolysis plant for thermal processing of SHW" the purpose of dissertation research is reached, namely:

- obtained a simulation model of the control object, the installation of pyrolysis in the superadiabatic mode of pyrolysis, which allows to calculate the composition of the product gas with maximum calorific value with a minimum amount of carbonaceous residue in any composition of SHW. The maximum calorific value of the product gas is due only to the process of processing SHW in the superadiabatic mode with the possible minimum controlled use of air as an oxidant.

- the possibility of the existence of solutions of the model of the control object on the energy balance is determined. The obtained ratio of energy, which is concentrated in the reaction products, which is necessary to support the pyrolysis process provides the ability to organize the process without air. The minimum amount of additional air or high humidity of SHW provide the maximum calorific value of the product gas formed.

- the method of automated control of pyrolysis of SHW for maintenance of the set composition of product gas at drawing disturbances by a composition of product gas, structure and humidity of initial SHW is developed.

- the simulation model of the automated control system of the pyrolysis installation is synthesized, which allows to stabilize the technological process of obtaining product-gas at the set technological values. The object of control of adjustable parameters is: the liquid level in the gasholder; product gas consumption; the temperature of the pyrolysis (product gas); product-gas composition. Control effects are: SHW consumption; air consumption; product gas recirculation

consumption. External disturbances to the object are: the set consumption of product-gas and the composition of SHW.

Keywords: ACS, SHW, pyrolysis, identification, product-gas, energy balance, library method, energy balance, difficult task of interpretation.

LIST OF PUBLICATIONS

Publications where the main scientific results of the dissertation are published

1. 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. Volume 3/6. P. 22–30. (SCOPUS).
2. Maksymov M., Brunetkin O., Beglov K., Alyokhina S., Butenko O. Automatic Control for the Slow Pyrolysis of Organic Materials with Variable Composition. *Advanced Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics River Publishers*. 2021. Chapter 14. P. 397-430. ISBN:978-87-7022-341-6 (Hardback), ISBN:978-87-7022-340-9 (Ebook) (SCOPUS).
3. Butenko O., Maksymov M., Demidenko V., Brunetkin O. Search method for solving a complex interpretation problem to solve the inverse problem for determining the composition of fuel. *Ship power plants. Scientific and technical collection*. 2019. Volume 39. P. 30–42.
4. Maksymov M., Demidenko V., Butenko O., Brunetkin O. Model of pyrolysis of organic substances of variable composition. *Integrated technologies and energy saving*. 2020. Volume 3. P. 12- 24. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.3.02.
5. Maksymov M., Demidenko V., Butenko O., Brunetkin O. Determination of fuel composition for the Armed Forces of Ukraine by the library method. *Collection of scientific works of the Scientific Research Center of the Armed Forces of Ukraine "State Oceanarium" of the Institute of the Navy of NU "Odessa Maritime Academy"*. 2020. Volume 1 (3). P. 102-110.

6. Butenko O., Larionova O. Simulation model of solid household waste as an object of management. *Scientific notes of TNU named after V. Vernadsky. Series Technical Sciences*. 2021. Volume 32 (71) № 2. P. 92-105.

Published works of approbatory character

1. Maksymov M., Butenko O., Demidenko V., Maksymova O. Development of a method for determining the objective function of optimization of a power plant. *Modern scientific challenges and trends: a collection scientific works of the International scientific conference*. 2018. Volume 9. P. 128-133.

2. Butenko O., Demidenko V., Maksymova O. Development of the control system data ware and software for a heat supply variable structure system. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine: a collection scientific works of the International scientific and practical conference*. 2018. P. 67-71.

3. Butenko O., Demidenko V., Brunetkin O. The method of identifying the composition of gaseous fuel. *Modern Trends in Science: proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*. 2018. P. 39-40.

4. Butenko O., Demydenko V., Brunetkin O. The method of identification of the composition of gaseous fuel. *Prospective directions of scientific thought: proceedings of the international scientific-practical conference*. 2018. Volume 5. P. 63-69.

5. Butenko O., Demidenko V., Bondarenko V., Brunetkin O. Model and method for determining the consumption of combustion products of gases of natural and artificial origin. *Measuring and Computing Engineering in Technological Processes (VOTTP_18_2018): proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference*. 2018. P. 56-59.

6. Butenko O., Demidenko V., Brunetkin O. Development of a method for modeling technical systems. *Science: discoveries and progress: proceedings of articles the III International scientific conference*. 2018. P. 28-29 [Electronic resource]. ISBN 978-80-7534-188-4 + ISBN 978-5-00090-136-6.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	17
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ТПВ ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ.....	26
1.1 УТВОРЕННЯ ВІДХОДІВ	27
1.2 АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТПВ.....	30
1.3 ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ І УТИЛІЗАЦІЇ ТПВ	34
1.3.1 Піроліз.....	36
1.3.2 Спалювання ТПВ в установках з механічними колосниковими решітками.....	38
1.3.3. Спалювання в киплячому шарі.....	40
1.3.4. Спалювання в металургійних печах	41
1.4 АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН ПРИ ТЕПЛОВІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ТПВ....	43
1.5 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АСК ПРИ УПРАВЛІННІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ПЕРЕРОБКИ ТПВ.	45
1.6 ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	54
1.7 ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ	61
РОЗДІЛ 2 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТПВ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	63
2.1. ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТПВ.....	63
2.2. Існуючі технологічні схеми термічної переробки ТПВ на піролізних установках.....	67
2.3. МЕТОД І ТЕХНОЛОГІЯ ВИВЕДЕННЯ СПОЛУК Cl, S і F при піролізі ТПВ.	72
2.4. ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА ТЕРМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ТПВ ПІРОЛІЗНОЮ УСТАНОВКОЮ В АДІАБАТИЧНОМУ ПОТОЦІ.....	75
2.5. ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ	81

РОЗДІЛ 3. МЕТОД БІБЛІОТЕКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ПРОДУКТІВ ПІРОЛІЗУ ТПВ	83
3.1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.	83
3.2. МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ УМОВНОЇ ФОРМУЛИ ТПВ	85
3.2.1 Аналіз можливості вирішення завдання визначення умовної формули ТПВ.....	85
3.2.2 Визначення методу розв'язання задачі контрольованого спалювання газоподібного палива змінного складу.	89
3.3. СПОСІБ ЗАПОВНЕННЯ БІБЛІОТЕКИ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ПРЯМОЇ ЗАДАЧІ	92
3.4. МЕТОД ПОШУКУ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗВОРОТНОЇ ЗАДАЧІ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ НА БАЗІ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ БІБЛІОТЕКИ.....	97
3.5. РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗВОРОТНОЇ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ПАЛИВА	99
3.5.1. Моделювання технологічних вимірів без похибок	99
3.5.2. Моделювання технологічних вимірів з прийнятими похибками	102
3.5.3 Вплив умов на результати моделювання визначення складу спалюваного газу методом бібліотеки.....	104
3.6. Висновки до ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ	105
РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ ПІРОЛІЗУ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ТБО.....	107
4.1 МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ ПІРОЛІЗУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	108
4.1.1. Моделювання процесу піролізу через бруто-формулу ТПВ.	108
4.1.2. Аналіз моделі об'єкта керування для вирішення завдання управління.....	111
4.1.3. Результати моделювання продуктів утилізації ТПВ.....	113
4.2. СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ ПІРОЛІЗУ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ПРОДУКТ-ГАЗУ З ТПВ.....	117
4.2.1. Метод керування установкою піролізу.....	117
4.2.2. Імітаційна модель САК установкою піролізу	119

4.3. РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ САУ ПРОЦЕСОМ ПІРОЛІЗУ. 127

4.4 Висновки до четвертого розділу 132

ВИСНОВКИ 133

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 137

ДОДАТОК А..... 155

ДОДАТОК Б 159

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСК— автоматизована система керування

АСР — автоматизована система регулювання

АСУ ТП — автоматизована система управління технологічним процесом

ТПВ — тверді побутові відходи

ЖКГ— житлово-комунальне господарство

ККД — коефіцієнт корисної дії

ПЕТФ — поліетілентерефталат

САК — система автоматизованого керування

САР — система автоматизованого регулювання

САУ — система автоматизованого управління

ВСТУП

Актуальність теми. Промислові відходи утворюються в результаті виробничих циклів, а побутові відходи виникають в результаті проходження життєвого циклу людини. Основними методами утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) є захоронення на полігонах і промислова переробка. У даній роботі будуть представлені дослідження, пов'язані з автоматизованим управлінням процесу термічної переробки ТПВ, які утворюються у населення, в торгових підприємствах, установах і муніципальних службах.

Аналіз світового досвіду показав, що найдоступнішим і економічно доцільним способом утилізації ТПВ є їх різноманітна термічна обробка.

Дорожня карта Європейського союзу з утилізації муніципальних відходів передбачає до 2035 захоронення на полігонах не більше 10% від їх обсягу. Решта обсягу повинна перероблятися або спалюватися. Spiegel [1] відзначає, що в даний момент тільки 16% пластикових відходів піддається вторинній переробці.

Як заміна спалювання ТПВ альтернативою вважається автоматично керований процес двостадійного піролізу з подальшим використанням отриманих горючих речовин в енергетичному устаткуванні.

Процес піролізу відомий для переробки ТПВ вже протягом тривалого часу. Але більша частина одержуваних продуктів знаходиться в газовій фазі, тому вони повинні бути використані відразу після утворення. Різний склад ТПВ веде до зміни складу одержуваних продуктів. Визначальним фактором, що впливає на кількісне співвідношення речовин в суміші продуктів реакції, є вологість ТПВ. На даний момент виділені особливості для проведення керованого процесу піролізу – це фіксований і відомий склад ТПВ.

Процес піролізу вважається переважним при переробці ТПВ з метою отримання вторинних енергоресурсів. Як показують теоретичні [2] і експериментальні [3] дослідження, із зростанням температури процесу збільшується вихід горючої газоподібної фази. При високій температурі

($\sim 1500^{\circ}\text{C}$) і наявності необхідної кількості водяної пари маса вуглистого залишку і конденсованої фази може бути зведена до мінімуму.

В роботі [4] запропонований метод визначення в режимі реального часу брутто-формули і теплотвірної здатності газоподібного палива в процесі його спалювання в спеціальному пристрої. В якості вихідних даних використовуються величини заміряних витрат газу і повітря, а також температури продуктів згорання. Об'єднання технології піролізу, побудованої на основі методу газифікації в нададіабатичному режимі [5], з методом визначення в режимі реального часу складу продукт-газу [4] створює можливість автоматизувати процес переробки ТПВ. Автоматизація такого процесу піролізу дозволить виключити з технологічного ланцюжка стадію синтезу рідких горючих речовин і їх зберігання.

Наразі немає єдиного методу автоматизованого управління процесом спалювання ТПВ невідомого складу. Використання будь-яких видів екстремальних регуляторів має загальний недолік, який залежить від виду екстремальної характеристики. При наближенні до точки екстремуму градієнт вимірюваного параметра до прийнятої обчислювальної похибки зменшується до нуля. Таке відбувається як для моменту визначення максимальної температури при горінні, так і для стадії визначення максимальної температури теплоносія. Аналогічна властивість градієнта вимірюваного параметра виникає і при визначенні мінімальної концентрації окису вуглецю (CO) при мінімальній концентрації кисню в димових газах, коли останнє значення наближається до нуля. З урахуванням наявності порога чутливості і похибок систем вимірювання та регулювання в точці екстремуму виникають великі похибки визначення величини, пошук якої здійснюється. Шуми вимірювальних каналів так само вносять негативний вплив на точність визначення такої величини. Як наслідок, поблизу точки екстремуму утворюється максимальна похибка вимірювання, що істотно ускладнює, а в ряді випадків робить неможливим використання

екстремальних регуляторів для управління спалюванням палива змінного складу.

Велика частина розрахунків параметрів процесів горіння виконується на основі методів хімічної кінетики через визначення наведеної формули суміші як окремої речовини. При використанні такого підходу для розгляду процесу горіння суміші газів розраховується ентальпія і визначається брутто-формула. Така задача є зворотною і некоректно поставленою.

Не існує єдиного методу вирішення всього різноманіття зворотніх, некоректно поставлених задач. Кожен їх вид вимагає індивідуального підходу. Це ускладнює або навіть виключає використання існуючих методів рішення в автоматичному регуляторі визначення брутто-формули пального змінного складу. Крім того, склад пального може багаторазово випадково змінюватися протягом будь-якого проміжку часу, що характерно для синтез-газу, отриманого при термічній переробці ТПВ. Це спричиняє необхідність оперативного багаторазового отримання рішення задачі, що призводить до необхідності розробки нового методу розв'язання оберненої і некоректно поставленої задачі для розв'язання завдання автоматизованого керування процесу перелізу ТПВ.

Необхідність удосконалення моделей і методів автоматизованої системи керування енергетичною установкою піролізу для термічної утилізації твердих побутових відходів за рахунок ідентифікації їх складу при нададіабатичному розкладанні для отримання продукт-газу максимальної теплотворної здатності, за рахунок розв'язання оберненої і некоректно поставленої задачі пошуку найкращого рішення при термічній утилізації ТПВ і визначає актуальність цієї роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до Програми поводження з твердими побутовими відходами, яку затверджено постановою КМУ від 4.03.2004 р. за № 265 та Загальнодержавної програми поводження з відходами на 2013–2020 роки, яку затверджено постановою КМУ від 3.01.2013 р. № 22-р.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вдосконалення методів і моделей автоматизованої системи керування енергетичною установкою піролізу для термічної утилізації твердих побутових відходів за рахунок ідентифікації їх складу при нададіабатичному розкладанні для отримання продукт-газу максимальної теплотвірної здатності.

Досягнення мети здійснюється:

- аналізом забруднення навколишнього середовища ТПВ, що утворилось; технологій їх термічної утилізації; автоматизованих систем керування такими технологіями;

- ідентифікацією складу та класифікацією ТПВ за ознаками, отриманими при його моделюванні умовною брутто-формулою та виявленням речовин, які утворюють «кислі гази» і, як наслідок, запропонуванням схеми термічної переробки відходів установкою піролізу;

- пошуком методу розв’язання оберненої і некоректно поставленої задачі з визначення складу ТПВ, що утилізується в установці піролізу з метою отримання продукт-газу максимальної теплотвірної здатності;

- розробкою методу проведення керованого піролізу для утилізації ТПВ при нададіабатичному розкладанні та імітаційної моделі автоматизованої системи керування, що дасть змогу отримати продукт-газ максимальної теплотвірної здатності.

Об’єкт дослідження – автоматизована система керування енергетичною установкою піролізу при нададіабатичному розкладанні речовини, що використовує ТПВ з великою кількістю органічних сполук, які дають можливість утворення продукт-газу максимальної теплотвірної здатності.

Предмет дослідження – методи і моделі автоматизованого керування енергетичною установкою піролізу, що утилізує ТПВ та створює умови пошуку утворення продукт-газу максимальної теплотвірної здатності.

Методи дослідження – математичний аналіз допоміг визначити властивості аналізованих функцій; імітаційне моделювання підтвердило

одержані теоретичні результати; методи системного аналізу використані для декомпозиції технологічного процесу; моделювання зміни теплотвірної здатності ТПВ залежно від якісного складу ТПВ, визначеного через брутто-формулу, дозволило обґрунтувати отримання максимального значення теплотвірної здатності продукт-газу; метод бібліотеки для розв’язання оберненої і некоректно поставленої задачі пошуку найкращого рішення при термічній утилізації ТПВ; моделювання нестаціонарних процесів піролізу, заснованих за законами збереження речовини Дальтона, хімічної рівноваги за парціальними тисками, засноване на рішенні системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, дало змогу врахувати вплив збурення за складом ТПВ на кількість утворення вуглистого залишку; методи чисельного моделювання зміни властивостей об’єкта керування дозволили визначити вид технологічної схеми термічної утилізації ТПВ; комп’ютерні інформаційні та програмні технології для реалізації розробленого алгоритму керування.

Наукова новизна одержаних результатів

– вперше представлено склад ТПВ в модельному уявленні їх умовною брутто-формулою, що дало змогу ідентифікувати та класифікувати ТПВ по групах за ознакою, якою стала кількість атомів хімічних елементів в умовній формулі: перша група CH_m , — вуглеводневі; друга група CH_nO_f , — вуглеводневі ті, що містять кисень; третя група $\text{CH}_w\text{O}_q\text{N}_k$, — вуглеводневі ті, що містять кисень та азот; четверта група CH_aF_x , CH_bCl_y , CH_dS_z — вуглеводневі ті, що містять активні елементи, які утворюють «кислі гази»;

– вперше запропоновано метод розв’язання оберненої і некоректно поставленої задачі як складного завдання інтерпретації з визначення складу ТПВ, що утилізується в установці піролізу. Для цього розроблено метод заповнення «бібліотеки» розв’язками прямої задачі, що дозволило вихідні дані прямої задачі (кількість атомів хімічних елементів в брутто-формулі ТПВ і їх ентальпію) записати в число-згортку, яке формується на основі позиційного принципу запису десяткових чисел, що і забезпечило формування тривимірного

масиву з врахуванням послідовного виділення областей збігу даних і обмежень, що дало можливість отримати розв'язок задачі у вигляді брутто-формули продукт-газу максимальної теплотвірної здатності;

– знайшла подальший розвиток імітаційна модель автоматизованої системи керування піролізною установкою, яка існуючі рішення моделі об'єкта керування, такі як витрати рециркуляційного продукт-газу та мінімальну кількість додаткового повітря і високу вологість ТПВ використовує для розрахунку регульованих параметрів (рівень рідини в газгольдері; витрата продукт-газу; температура протікання піролізу; склад продукт-газу) та керуючих впливів АСР (витрата ТПВ; витрата повітря; витрата рециркуляції продукт-газу) для компенсації зовнішніх збурень (задана витрата продукт-газу; склад ТПВ), що робить можливим проведення керованого піролізу в наадаіабатичному режимі, що уможливило знайти стале рішення для будь якого співвідношення «зовнішні збурення – керуючі впливи АСР», що дозволяє отримувати продукт-газ з максимальною теплотвірною здатністю при мінімальній кількості вуглистого залишку за будь-якого складу ТПВ.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені моделі і методи керування енергетичною установкою піролізу для термічної утилізації ТПВ. Запропонована технологічна схема дозволяє термічно утилізувати практичну більшість ТПВ та мінімізувати вплив «кислих газів», які виникають при піролізі.

Результати роботи впроваджено в ТОВ «Аграрний інститут». Модельні зразки САК пройшли випробування в ТОВ «Украгро» та впроваджені в навчальний процес ДУ «Одеська політехніка» кафедри комп'ютерних технологій автоматизації в дисциплінах «Моделювання теплоенергетичного обладнання в АСУ», «Динаміка теплових процесів», «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів», «Структурна та параметрична оптимізація».

Особистий внесок здобувача. Наукові здобутки, викладені в дисертаційному дослідженні, самостійно одержані автором. Автору належать основні ідеї у розробці методів і моделей процесу термічної переробки та утилізації за рахунок автоматизованого керування установкою піролізу при нададіабатичному розкладанні ТПВ для отримання продукт-газу максимальної теплотвірної здатності, при розв’язанні оберненої і некоректно поставленої задачі пошуку найкращого рішення для ідентифікації складу відходів. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: в [6, 7, 8, 9] – модельне уявлення ТПВ умовною брутто-формулою; в [10, 11, 12, 13] – метод розв’язання оберненої і некоректно поставленої задачі як складного завдання інтерпретації з визначення складу ТПВ; в [14, 15, 16, 17] – імітаційна модель автоматизованої системи керування піролізної установкою, яка існуючі найкращі рішення моделі об’єкта керування використовує для розрахунку регульованих параметрів.

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися і отримали схвалення на міжнародних науково-практичних конференціях і семінарах: «Modern scientific challenges and trends: IX International Scientific Conference» (м. Варшава, 2018); Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine: a collection scientific works of the International scientific and practical conference, Republic of Poland, (Wloclawek 2018); II міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку науки», (Київ 2018), МНЦД; Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективні напрямки наукової думки», (Тернопіль 2018); XVIII міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Одеса 2018); III International scientific conference. Science: discoveries and progress: Czech Republic, (Karlovy Vary 2018).

Публікації. Результати наукових досягнень викладені в 12 друкованих працях, з них 6 – у спеціалізованих наукових виданнях (2 публікації – у

міжнародній науково-метричній базі SCOPUS), 6 доповідей і тез доповідей – на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел з 155 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 161 сторінку (з них 118 – основного тексту), 21 рисунок, 14 таблиць.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ТПВ ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

Франція, ФРН і Швейцарія справедливо вважаються країнами першопрохідцями в галузі переробки ТПВ. У 60-ті роки ХХ століття технологічні компанії США і Японії почали інвестувати кошти в розробку технологій з переробки та утилізації побутового сміття [18].

Декларація з Охорони навколишнього середовища і розвитку була прийнята на Міжнародній конференції ООН в Ріо-де-Жанейро (1992), де було визначено світову політику щодо безпечної та екологічно прийнятної утилізації ТПВ. Вимоги до технологій переробки ТПВ – це ефективність, безпека і екологічність через способи повторного використання, сортування, розділення і утилізації [19, 20, 21]. Низка досліджень [20] показали, що накопичення відходів в країнах, що розвиваються, впливає на глобальну стійкість навколишнього природного середовища [21]. Більш того, поліпшення економічного розвитку країн призведе до того, що міські агломерації до 2025 року будуть генерувати 1,3 мільярда тонн ТПВ в рік [22]. Відкрите полігонне зберігання ТПВ в розвинених країнах вважається неприйнятним, дослідження показали [22, 23], що такий спосіб утилізації викликає локальні повені, забруднення землі, води і повітря. Великобританія, США, Японія, Італія ввели безвідходне муніципальне управління ТПВ [24], куди входять, в першу чергу, технології термічної утилізації [25-31] і повторне використання і переробка [32]. Аналіз джерел і статистичної інформації дозволив сформувати порівняльну таблицю 1.1.

Найпоширеніший спосіб утилізації ТПВ в світі – це полігонне захоронення.

Спалювання відходів — найбільш ефективний спосіб, тому що їх обсяг зменшується суттєво і є можливість отримувати теплову енергію і, як наслідок,

Таблиця 1.1

Співвідношення методів утилізації ТПВ в різних країнах

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

мінімізується шкідливе навантаження на навколишнє середовище, але синтезуються високотоксичні органічні сполуки. Тому в подальшому в межах зазначеного розділу доцільно розглянути утворення ТПВ та провести аналіз їх складу та класифікувати за ступенем загрози навколишньому середовищу при їх термічній переробці.

1.1 Утворення відходів

Під поняттям «відходи» будемо розуміти будь-які речовини, матеріали і предмети, що утворилися в процесі виробництва або споживання, і які не можуть далі використовуватися за місцем їх утворення чи виявлення. З одного боку, відходи – це забруднення, яке займає в природному середовищі простір і надає негативний вплив на нього, але, з іншого, це вторинні ресурси, можливо навіть поновлювані, які можуть бути використані для переробки з метою їх підготовки до безпечного зберігання або утилізації [33].

Під утилізацією відходів слід розуміти їх використання як вторинних матеріалів чи енергетичних ресурсів. Для визначення методів поводження з відходами стандартом ДСТУ 3910-99 визначено класифікацію відходів і правила їх категоріювання. Надалі в роботі під ТПВ будемо розуміти: предмети або товари для забезпечення життєдіяльності людини, що втратили споживчі

властивості і які становлять біологічні відходи і небіологічні тверді відходи штучного або природного походження.

Цікаві дослідження [34, 35, 36], які показують утворення ТПВ на одну людину протягом року в різних країнах ЄС. Обробка матеріалів дослідження дозволила сформулювати таблицю 1.2.

Таблиця 1.2

Обсяг утворення ТПВ в деяких країнах ЄС.

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

Такі країни, як Швейцарія, Швеція та Німеччина, відмовилися від полігонів ТПВ. Ці країни інвестують кошти в такі методи утилізації відходів, як сортування, спалювання та переробка. Румунія, Польща, Чехія, Латвія, Угорщина та Литва – це країни, які більшість своїх відходів утилізують на полігонах, а переробка, спалювання та сортування займає незначну частку. Отже, в Німеччині, Швейцарії, Швеції показник переробки відходів від загальної кількості всіх відходів в країні становить 46,6%, 32,6% та 33,3% відповідно. В інших країнах він коливається від 16,6% до 25%, в Румунії цей показник становить лише 6 %.

За даними Мінрегіону у 2017 році в Україні (без урахування даних АР Крим та м. Севастополь і тимчасово окупованих територій Донецької та Луганської областей) утворилося близько 52 млн м³ або близько 10 млн тонн побутових відходів. З них перероблено та утилізовано лише близько 6,6 % побутових відходів, з яких 2,48 % спалено та 4,18 % потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та заводи переробки ТПВ, всі інші були захоронені чи вивезені на стихійні сміттєзвалища.

Як свідчать матеріали, збір і переробка ТПВ – актуальне питання для нашої країни. Українські екологи-науковці представили матеріали про кількість ТБО в Україні і як вона зростає кожного поточного року. Полігони розташовані за межами міст, перенаповнені ТПВ. Проблема утилізації відходів в міських ЖКГ стоїть дуже гостро і періодично посилюється надзвичайними ситуаціями, стан ТПВ в країні приведено в таблиці 1.3.[36]

Таблиця 1.3

Стан ТПВ за адміністративно-територіальним поділом України без урахування анексованих територій АР Крим і частки Луганської та Донецької областей.

Адміністративно-територіальний поділ	Обсяги ТПВ			
	захоронення на полігоні – всього на 2019 р.		зібрано всього за 2019 р.	
	млн. м ³	млн. т	млн. м ³	млн. т
1	2	3	4	5
Вінницька	32,16	64,07	1,48	0,29
Волинська	16,24	48,33	1,12	0,33
Дніпропетровська	44,16	76,33	4,98	0,83
Донецька	64,49	18,56	2,70	0,54
Житомирська	26,59	7,05	1,38	0,31
Закарпатська	11,81	3,60	1,32	0,33
Запорізька	52,02	12,72	3,70	0,61
Івано-Франківська	16,82	3,88	1,03	0,19
Київська	27,64	44,66	1,95	0,35
Кіровоградська	18,61	4,46	1,71	0,37
Луганська	15,17	4,04	0,67	0,16
Львівська	623,06	7,73	4,08	0,69

1	2	3	4	5
м.Київ	49,87	13,45	7,83	1,45
Миколаївська	70,50	14,96	1,28	0,22
Одеська	33,96	8,49	3,39	0,85
Полтавська	43,69	8,40	1,90	0,31
Рівненська	34,17	7,92	1,25	0,23
Сумська	12,54	0,39	0,80	0,18
Тернопільська	22,98	5,65	0,92	0,29
Харківська	81,12	16,12	3,74	0,75
Херсонська	28,54	8,37	0,76	0,18
Хмельницька	47,39	9,72	1,65	0,35
Черкаська	14,92	3,48	1,27	0,19
Чернівецька	10,49	2,62	0,80	0,20
Чернігівська	34,16	8,33	1,25	0,23
Всього по Україні:	1433,11	233,44	52,92	10,42

Аналіз показує, що до 2020 року в Україні утворилося 441,2 мільйона тонн відходів. Найбільше відходів утворили у Дніпропетровській та Полтавській областях. Так, у Дніпропетровській області утворилось 251,9 млн тонн відходів — це 57% від усього сміття в Україні. Далі йде Полтавська область з 97,4 млн тонн — це 22% від усіх відходів. У п'ятірку також входять Кіровоградська (8,5%), Донецька (5,8%) та Запорізька області (1,2%).

1.2 Аналіз структури ТПВ

Аналіз структури ТПВ проведемо, використовуючи поняття морфологічного складу ТПВ, яке має на увазі процентний вміст маси компонентів ТПВ. Морфологічний склад ТПВ залежить від кліматичних зон і пори року.

У відкритих джерелах для умов України не було знайдено результатів систематичних досліджень морфологічного складу ТПВ. Єдиними джерелами статистичних даних були невеликі дослідження, які проводилися операторами ТПВ та відповідними асоціаціями в той чи інший час у тих чи інших регіонах. Їх результати суттєво різняться між собою. Наприклад, згідно з дослідженнями, проведеними в межах національного проекту «Чисте місто», найбільші частки у

морфологічному складі ТПВ припадають на продукти харчування (більше ніж 30% загального обсягу) та відходи упаковки, в основному картон і папір [37,38].

За даними інших досліджень [39-42], до структури ТПВ входять 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% та інші відходи — 10% [43]. Розбіжності в даних, скоріш за все, пов'язані з обмеженим обсягом вибірки.

Обробка даних [37-42] дозволила отримати такі результати по морфологічному складу ТПВ для України в 2018 році, а саме харчові відходи — 54,2%, папір і картон — 16,3%, деревина — 3,5%, метали — 4,2%, текстиль — 6,7%, скло — 4,3%, пластмаса — 6,3%. Окрім того, можливо, що частину органічних відходів не було включено для оцінювання.

За даними Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства України», морфологічний склад ТПВ представлено в таблиці 1.4.

Кліматичні зміни складу характеризуються збільшенням вмісту харчових відходів, що підтверджено даними, наведеними в таблиці 1.5.

Таблиця 1.4

Морфологічний склад ТПВ за даними [43].

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

Таблиця 1.5

Морфологічний склад ТПВ в залежності від кліматичних зон [44,45,46].

Склад	Кліматична зона, % за масою		
	Субтропіки	Степи	Мішані ліси
Харчові відходи	40...49	35...45	32...39
Папір, картон	22...30	32...35	26...35
Деревина	1...2	1...2	2...5
Чорні метали	2...3	3...4	3...4
Кольорові метали	0,5...1,5	0,5...1,5	0,5...1,5
Текстиль	3...5	3...5	4...6
Кістки	1...2	1...2	1...2
Скло	2...3	2...3	4...6
Шкіра, резина	1	0,5...1	2...3
Силікатні матеріали	7...9	5...8	5...8
Пластмаса	3...6	3...4	3...4

На сьогодні в складі ТПВ збільшився вміст кольорових металів за рахунок появи алюмінієвих банок з-під напоїв та вміст пластмасових пакувальних матеріалів і пляшок (поліетілентерефталат - ПЕТФ-пляшок), водночас зменшилася доля органіки, яка легко розкладається (харчові відходи) [44,45,46].

Відходи, які утворюються в житловому секторі та на комунальних підприємствах, мають істотні відмінності за морфологічним складом, що підтверджено даними, наведеними в таблиці 1.6.

Важливим фізичним властивістю ТПВ, що визначає його енергетичну цінність, є вологість. Дані наведено таблиці 1.7

Таблиця 1.6

Морфологічний склад ТПВ житлових комплексів і муніципальних підприємств [44,45,46].

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

Таблиця 1.7

Вологість ТПВ та їх складові компоненти за порами року [44,45,46].

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

1.3 Енергетичні технології переробки і утилізації ТПВ

До технологій енергетичної переробки ТПВ відносяться: спалювання на механічних колосникових решітках в шарових топках, спалювання в киплячому шарі, спалювання в барабанних печах, спалювання в металургійних печах. Існує технологія, де ТПВ використовують в якості додаткового палива для випалу клінкеру в цементних печах [47,48]. У Європі таким чином утилізуються більше 350 тис. тонн палива з ТПВ щорічно.

Серед енергетичних технологій утилізації ТПВ низка дослідників виділяють піроліз [49, 50]. Метод піролізу має такі переваги: – безвідходна технологія, але можливі шкідливі викиди і відходів, що забруднюють навколишнє середовище; – руйнування і перетворення отруйних сполук в горючі або інертні; – можливість акумулювати газ і передавати його в міру необхідності споживачам; – спільна переробка побутових і промислових відходів; – найменша земельна ділянки на одиницю потужності (в порівнянні з іншими методами знешкодження). Відбір утильних фракцій і попередня сортування ТПВ дозволяє поліпшити умови термічної і біотермічної переробки ТПВ.

Для подальшого вивчення термічних технологій переробки ТПВ та визначення умов конкурентоспроможності між собою та іншими енергетичними технологіями доцільно розглянути критерій оцінки енергоефективності термічної переробки ТПВ.

В ЄС на всіх установках в процесі термічної переробки ТПВ енергія, що виділяється, перетворюється в теплову для відпустки споживачеві або для вироблення електроенергії. Європейським законодавством [51] запропонована формула оцінки енергетичної ефективності (E) установок, в яких відбувається процес термічної переробки ТПВ з метою вироблення теплової або електричної енергії для відпускання споживачеві. Таку формулу можна представити наступним чином:

$$E = (E_p - (E_f + E_i)) / (0,97 (E_w + E_i)) \quad (1.1)$$

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

В [52] відзначається, що E не характеризує термодинамічну ефективність, тому через ефективність перетворення при відпустці електроенергії і тепла ця величина в низці випадків може бути більше 1. Там же в [52] аналізується, як пов'язаний показник E з прийнятими в теплоенергетиці ККД і коефіцієнтом використання тепла палива. Застосування виразу (1.1) для різних граничних умов наведено в [53]. Вираз (1.1) дає можливість визначити напрямок діяльності підприємства або на термічну переробку ТПВ з метою виробництва енергетичної продукції, або просто на термічну утилізацію відходів. Відповідно до [51] процес термічної переробки ТПВ вважається утилізацією, коли енергетична ефективність процесу становить 0,65 і більше. За даними [54] з 420 установок для термічної переробки відходів розташованих ЄС біля 60% мали енергоефективність менше 0,6.

Якщо установка відпускає електрику зовнішньому споживачеві (або комбінований відпуск теплової та електричної енергії) та її енергетична ефективність складає $E=0,65$ і більше, то вона відноситься до класу енергогенеруючої установки на ТПВ. Слід зазначити, що з економічної точки зору виробляти електроенергію за рахунок термічної переробки відходів стає доцільним, якщо доходи від продажу електроенергії покривають витрати, пов'язані з додатковими капітальними і експлуатаційними витратами на

придбання, розташування і обслуговування основного і допоміжного електрогенеруючого обладнання.

1.3.1 Піроліз

Піроліз — це процес термічного розкладання твердих палив без доступу повітря, який дає можливість отримати газоподібний продукт. Велика кількість науковців стверджує, що використання процесу піролізу широкого розповсюдження не отримав із-за притаманних йому технологічних труднощів, а саме — у регулюванні і управлінні самим процесом. Побутові відходи містять хлор і фтор (в пластмасах). При термічному розкладанні без доступу повітря утворюються небезпечні, шкідливі та отруйні речовини. Та незважаючи на існуючі факти і докази існує і протилежна думка [38].

В подальшому під піролізом або газифікацією ТПВ будемо розуміти необоротну хімічну зміну компонентів сировини при її термічному розкладанні при нестачі окиснювача, в результаті утворення хімічних сполук. Сировина, в основу якої покладено ТПВ, різноманітна, в першу чергу, за хімічним складом, тому мова не може йти про вибірковий процес, в результаті якого утворюється велика кількість різноманітних сполук.

При термічному розкладанні ТПВ виділяють два типи хімічних реакцій. По-перше, це термічний розпад вихідної речовини з подальшим розкладанням проміжних сполук. По-друге, полімеризація і конденсація речовин, що утворилися в результаті первинних реакцій деструкції сировини.

Відповідно до температурного рівню процесу визначають:

— низькотемпературний піроліз ($400\ldots 600^{\circ}\text{C}$) з мінімальним виходом газу та максимальним отриманням рідких та твердих речовин (смол, олій і твердого залишку);

— середньотемпературний піроліз (до 900°C), при проведенні якого суттєво збільшується кількість одержаного газу;

— високотемпературний піроліз ($900\ldots 1200^{\circ}\text{C}$) з максимальним виходом газу і мінімальним отриманням рідких та твердих речовин.

Кожному температурному рівню процесу піролізу відповідає своя технологічна схема, основним елементом якої є шахтна піч і, обов'язково, система зв'язування хімічно активних і забруднюючих сполук. В печі утворюються вуглецевий залишок, де містяться всі забруднюючі забруднюючі сполуки в зв'язаному стані, і пірогаз від розкладання ТПВ. На думку деяких науковців, екологічно чистим методом знешкодження відходів є метод піролізу. Таким чином, вважається, що піроліз може забезпечити ефективну утилізацію відходів і перетворити енергетичний потенціал ТПВ для енерготехнологічного використання в якості палива і сировини при одночасному запобіганні викидів. А всі шкідливі і забруднюючі речовини будуть знаходитись хімічно зв'язаними в вуглецевому залишку.

Але існує і протилежна думка, що неможливо зв'язати всі забруднюючі сполуки, і газ піролізу містить всі зазначені вище шкідливі та отруйні речовини (притаманні тепловій переробці ТПВ), бо не існує універсальних високоефективних газоочисних пристроїв, які очищали б від усієї гами цих речовин. А виникнення вуглецевого залишку викликає утворення інших шкідливих речовин, для яких також необхідна установка спеціальних газоочисних пристроїв.

Науковці, які відстоюють свою позицію, наводять два основних недоліки процесу піролізу, а саме:

— одинична продуктивність печі піролізу установки не може бути великою, тому що зі збільшенням продуктивності установки значно ускладнюються її вузли, а сам процес стає неконтрольованим і, як наслідок, такий спосіб для великих урбанізованих територій неприйнятний;

— вважається, що для здійснення процесу піролізу ТПВ у печах з низькою теплоутворюючою здатністю $3500\ldots 7500$ кДж/кг потрібні значні додаткові енергоресурси для проведення процесу піролізу, а для низько енергетичного

піролізного газу, у якого теплоутворююча здатність 3000 кДж/м^3 , необхідно затратити значну кількість додаткового викопного палива з метою забезпечення стабілізації процесу горіння, що робить цей спосіб достатньо енерговитратним.

1.3.2 Спалювання ТПВ в установках з механічними колосниковими решітками.

Топки з шаровим спалюванням ТПВ на сьогодні найбільш поширені в світовій практиці, перш за все, розрізняються за типом і принципом роботи колосникових решіток. Застосовуються наступні типи механічних решіток: перештовхуючі колосникові решітки (похило-перештовхуючі і зустрічно-перештовхуючі, назад-перештовхуючі) і валкові колосникові решітки.

Перештовхуючі решітки складаються з окремих нерухомо закріплених і тих рухливих решіток, що чергуються і перекривають одна одну в напрямку переміщення ТПВ колосникових секцій. Повітря для горіння надходить в шар ТПВ через щілини між колосниками або отвори в торцевій поверхні колосників. Колосники ті, що перештовхують колосникові решітки відлиті зі сплаву з високим вмістом хрому. Рухливі колосники секцій здійснюють зворотно-поступальний рух з довжиною ходу приблизно 150 мм. У топках середньої і великої продуктивності полотно, яке перештовхує колосникові решітки, зазвичай складається з декількох секцій, розміщених по довжині і ширині. Це дозволяє створювати колосникові решітки для котельних агрегатів різної продуктивності зі стандартних модулів з мінімальними витратами.

Зворотно перештовхуючі колосникові решітки, мають по черзі розташовані нерухомі і рухомі ступені колосників, проте мають більш складну кінематичну схему. Рухливі колосники здійснюють зворотно перештовхуючий рух і дозволяють подавати 15...30% палаючої маси відходів назустріч шару сировини, що рухається. Зворотно перештовхуючі колосникові решітки мають нахил в сторону вивантаження шлаку (кут нахилу становить 24...26 градусів), тому основна маса ТПВ 70...85% під дією власної ваги повільно переміщається

до вихідної частини решітки, при чому вона інтенсивно переміщується і доповнюється.

Така організація руху сировини забезпечує процеси сушіння і займання ТПВ, створюючи вогнища нижнього запалювання сировини, що лежить на колосниках. Таке рішення також запобігає прогару і оголенню окремих ділянок площини колосникових решіток.

Елементи решітки, що рухаються, пересуваються механізмами, які приводяться в дію гідравлічними приводами, за допомогою яких можна змінювати швидкість переміщення колосників відповідно до характеристик спалюваних відходів. Шлак, який утворюється, захоплюється підпорним валом з регульованим приводом, що повільно обертається, регулює товщину шару на останніх колосниках. Потім шлак падає в шлакову ванну. Решітка розрахована на високий аеродинамічний опір і її живий перетин повітрям становить всього 2%. Таке рішення дозволяє забезпечити рівномірну роздачу дуттьового повітря по ширині решітки незалежно від щільності шару ТПВ і зменшити нерівномірність вигорання ТПВ.

Валкова колосникова решітка складається з 6-ти валків діаметром 1,5 м і довжиною до 6 м. Валки розташовані на різній висоті і мають горизонтальну вісь обертання. Валки виготовлені з чавунних колосників і насаджені на циліндричний каркас, який закріплено на пустотілому валу. Валки оснащені електроприводом і обертаються з частотою обертання 1...11 об/год. Кожен з них має безступінчасте регулювання швидкості обертання, завдяки чому процес горіння підтримується відповідно до властивостей ТПВ, яке надходить. Сушка і підігрів ТПВ відбуваються на першому і частково на другому валках, інтенсивне згорання - на наступних валках, а випалювання - на двох останніх валках. Однією з переваг даного типу решітки є те, що тільки 50% площі поверхні валка звернена до топки, інша частина знаходиться не в зоні невисокої температури. Конструктивні труднощі викликає ущільнення зазорів між валками, тому що живий перетин решітки становить 12% всієї площі поверхні.

1.3.3. Спалювання в киплячому шарі

Відмітна особливість процесу спалювання в киплячому шарі полягає в створенні ефекту псевдокипіння ТПВ. В якості інертного матеріалу, який утворює висхідний потік, зазвичай використовують кременистий пісок, що відібрано селективно. Йому притаманна велика теплоємність і за рахунок цього стабілізується температура процесу незалежно від значних змін якості і кількості відходів, що завантажують. Інтенсивне кипіння шару призводить до енергійного перемішування відходів, окиснювача і продуктів згорання, що призводять до інтенсивного запалювання, що є важливою перевагою таких топок. За рахунок турбулентного перемішування і інтенсивної теплопередачі, що відбуваються в киплячому шарі, для повного згорання ТПВ потрібна менша кількість надлишкового повітря, що забезпечує меншу витрату димових газів. Топки з киплячим шаром мають наступні модифікації: з бульбашковим (стаціонарним) киплячим шаром; з циркулюючим киплячим шаром (з зовнішньою або внутрішньою циркуляцією); з вихровим киплячим шаром.

Установки для спалювання відходів в бульбашковому киплячому шарі характеризується низькими швидкостями (до 2,5 м/с) повітря, що подається на спалювання, і невисокими лінійними енергонапругами до 2 МВт/м. На установках з бульбашковим киплячим шаром спалюють в основному спеціально підготовлені побутові відходи, осад стічних вод, відходи деревини. Аналіз установок, що спалюють непідготовлені ТПВ, до складу яких входить топка з бульбашковим киплячим шаром, показує, що проблеми, які виникають під час експлуатації, пов'язані з підготовкою і транспортуванням сировини, вибором місця подачі відходів, охолодженням і видаленням золи.

Установки для спалювання ТПВ в циркулюючому киплячому шарі забезпечують швидкість повітря до 6 м/с і лінійну енергонапругу поверхні шару – 7 МВт/м. Випускають установки для спалювання ТПВ в циркулюючому киплячому шарі підприємства, що здійснюють постачання котельного обладнання на вугільні ТЕС. Вважається, що в котлах з циркулюючим киплячим

шаром можна спалювати палива з різними характеристиками, пристосовуючи його до конкретних умов, марки палива, практично не змінюючи конструкцію котла. Це справедливо стосовно різних видів вугілля, торфу, шламів, біомаси. У топках з циркулюючим киплячим шаром можна спалювати ТПВ тільки після їх попередньої підготовки (подрібнення, видалення металу і великих інертних матеріалів, ретельного перемішування), і якість цієї підготовки дуже сильно впливає, а часто і визначає надійність роботи всієї установки. Детальний опис розвитку спалювання ТПВ в котлах з ЦКШ, а також огляд різних модифікацій таких котлів, що виготовляються різними підприємствами, наводиться в [39].

Установки для переробки ТПВ в топках з вихровим киплячим шаром об'єднує в собі переваги класичної технології стаціонарного киплячого шару з перевагами циркулюючого киплячого шару. Розрізняють установки, що працюють за принципом одновихрового і двовихрового киплячого шару, для якого в нижній частині топкового пристрою формуються парні вихрові зони - так званий вихровий киплячий шар. У цій зоні відбувається основне горіння ТПВ за рахунок відповідної подачі повітря. Киплячий шар складається ніби з двох зон піску з перетином еліптичної форми, розташованих дзеркально по відношенню один до одного і які рухаються назустріч один одному.

Така організація спалювання забезпечує якісне поперечне перемішування матеріалу шару і створює необхідні умови для рівномірного і стабільного 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 подають вторинне повітря. В результаті такого двоступеневого спалювання зменшується утворення оксидів азоту, концентрація яких в димових газах знижується.

1.3.4. Спалювання в металургійних печах

Ще в 60-х роках було виконано великий обсяг досвідних плавок ТПВ в електропечі в Німеччині в широкому діапазоні температур 1100...1500°C [57] для

розробки технології спалювання. Технології спалювання ТПВ в жужільному розплаві металургійної печі має незаперечну перевагу - повне розкладання шкідливих сполук за рахунок високих температур. Більш того, відомо досить багато модифікацій технологій спалювання ТПВ в жужільному розплаві, які в залежності від характеру процесу розрізняють використання: доменних печей з додаванням вугілля; процесу Ванюкова, збагачення киснем дуття; флюмінгпроцесу, збагачення природним газом дуття; електрошлакового розплаву.

Металургійні технології пропонувалися для утилізації ТПВ за допомогою доменних і електричних печей, шахтних печей, електропечі і печі Ванюкова [58-66]. ТПВ змішуються з низькосортним вугіллям (витрата вугілля – 25...30% від кількості, що завантажується в піч відходів) і вапняком (витрата вапняку - 30% від кількості, що завантажується в піч відходів) завантажуються зверху в піч і продуваються попередньо підігрітим до 1000...1400 °С повітрям.

Продукти високотемпературної переробки - рідкий метал (чавун) і рідкий розплав шлаку - пропонується переробляти в вироби (без повторного їх нагрівання), а тепло відхідних газів утилізувати для виробництва теплової та електричної енергії. Серйозним недоліком запропонованої технології є необхідність подачі в процес спалювання ТПВ великих кількостей вугілля і вапняку.

Розглядається термічна переробка ТПВ, які в розплаві печі Ванюкова при відносно високих температурах (1250...1450°C) активно проводять барботаж в розплаві. Була пропозиція застосовувати процес плавки відходів в розплаві шлаку [58-60]. Даний процес розроблено і знайшов застосування в кольоровій металургії для плавки мідних концентратів. Принципова відмінність розробленої технології від попередньої полягає в тому, що процес плавки та утилізації ТПВ ведеться в автономному режимі на повітрекисневому дутті з вмістом кисню близько 50%.

В цілому слід зазначити, що основні недоліки всіх технологій спалювання ТПВ в металургійних печах пов'язані з досить складним запуском печі; складністю створення безінерційної системи автоматичного регулювання процесу і, відповідно, складністю підтримки заданої температури без додаткової витрати енергії і низькими тепловим ККД. Знешкодження відходів в металургійних печах, мабуть, доцільно в тому випадку, коли необхідно переробляти небезпечні відходи.

1.4 Аналіз утворення токсичних речовин при тепловій утилізації ТПВ.

Як було зазначено раніше, найбільшого поширення набули термічні способи утилізації ТПВ. При такому способі утилізації ТПВ виконується завдання, що забезпечує прийнятні обсяги викидів у навколишнє природне середовище. Справді, аналіз термічних способів утилізації показав їх явні переваги. Токсичні органічні компоненти піддаються повному окисленню, а мінеральні складові залишаються в твердих продуктах розплаву. Однак при спалюванні в газову фазу переходять сполуки ртуті, свинцю, кадмію і діоксини. З'єднання неорганічних речовин з хлором, фтором, важкими металами залишається в золі з підвищеною концентрацією вмісту. При спалюванні відходів, що містять хлор, утворюються токсичні речовини діоксини або фурани. При піролізі дуже високий вихід золи і шлаків. При піролізі утворюються поліциклічні ароматичні вуглеводні і поліхлоровані дибензо-*p*-діоксини і дибензофурани. Утворений вуглистий залишок містить високотоксичні речовини, а газ піролізу висококиплячі смоловидні речовини.

Під впливом високих температур при повному спалюванні утворюється газоподібні речовини, що містять хлор, фосфор, сірку, фтор в результаті утворюються оксиди і кислоти HCl , HF , SO_3 , P_2O_5 .

Часто при багатотоннажній переробці ТПВ не враховуються сезонні і добові нерівномірності зміни складу вихідної сировини, що призводить до збільшення утворення екологічно небезпечних речовин.

Процес газифікації при температурах понад 1200°C забезпечує відсутність органічних хлоровмісних домішок і отримується синтез-газ, який має високі показники теплотвірної здатності.

Всі види термічної обробки ТПВ сприяють утворенню діоксинів. Діоксини є кумулятивними отрутами і відносяться до групи небезпечних ксенобіотиків, які в малих концентраціях вражають всі форми живої матерії. Діоксин не розкладається у навколишньому природному середовищі і потрапляє в організм людини з їжею, водою і повітрям. Діоксини стабільні по відношенню до сильно лужних і сильно кислих середовищ в некаталітичних умовах. Період розкладання у воді 2 роки, в ґрунті 20 років. Ефективне розкладання при температурах 1200°C з витримкою більше 2 с в зоні горіння. При температурах $300\ldots 400^{\circ}\text{C}$ відбувається каталітичне утворення діоксинів, процес прискорюється наявністю частинок летючого попелу, присутністю слідів міді і наявністю атомарного вуглецю і хлору.

У процесі піролізу відходів виділяються особливо небезпечні шкідливі та отруйні речовини: зола і пил, на поверхнях яких абсорбовані важкі метали; фосген (COCl_2); діоксини ($\text{C}_{12}\text{H}_4\text{Cl}_4\text{O}_2$); фурани ($\text{C}_{12}\text{H}_4\text{Cl}_4\text{O}$); фосгеноксім (CCl_2NOH); хлорацетофенон ($\text{C}_6\text{H}_5\text{COCH}_2\text{Cl}$); хлорпікрин (Cl_3CNO_2); хлорціан (ClCN) та ін. Причому, більшість з них утворюється через нестачу окислювача, необхідного для тривання процесу піролізу [55].

Летючі речовини, які виділяються з ТПВ при нагріванні, піддаються термокисневому перетворенню в залежності від часу і температури перебування летючих речовин в реакторі, що дозволяє використовувати їх для утворення основних компонентів смол. Перша група – це ТПВ з вмістом целюлози, геміцелюлози, легніна і метоксіфенола. Друга група – це фенольні сполуки. Третя група алкілпроизводні ароматичні речовини аценафтен, метилнафталін, толуол. Четверта група, ароматичні вуглеводи бензол, нафталін, антрацен, фенантрен, пірен.

1.5 Методи і засоби підвищення ефективності АСК при управлінні енерготехнологічними процесами переробки ТПВ.

Дослідженню процесів автоматизованого керування енерготехнологічними установками під впливом збурюючих факторів, в тому числі і за складом палива, присвятили свої роботи В.А. Веніков [67], Г.П. Плетньов [68], А.А. Поляков [69], В.Я. Ротач [70].

Розглянуто вдосконалення АСР тепловим навантаженням котлів утилізаторів продуктів згорання при випадкових змінах витрат доменного та коксового газів і регулюючому впливові тільки на витрату сертифікованого газу [71]. Ефективність системи підвищується за рахунок використання математичних моделей каналів об'єктів керування другого порядку з запізненням в поєднанні з частотними розрахунком параметрів регулятора. Наведено статистичні характеристики випадкового сигналу по витраті газу, який утилізують за експериментальними даними. Наведено результати розрахунку оптимального налаштування контуру регулювання з регульованою змінною у вигляді сигналу по «теплу утилізації» з коливальним обмеженням частотного показника. Структуру компенсатора вибирають як з'єднання двох частин, одна з яких може бути диференційованою і при цьому реалізація другої частини компенсатора виконується за умови інваріантності, як при подачі компенсуючого сигналу на вхід об'єкту. Представлені результати моделювання при випадкових збуреннях за витратами газу утилізації.

Проведено аналіз з керування утилізаційними установками при спалюванні ТПВ [72]. Пропонується створення системи керування, коли установка по каналах регулювання навантаження і економічності є нелінійним зв'язним ОК. Для експлуатації установки розроблено універсальну структурну схему, яку можна створити на сучасному контролері, що мінімізує витрати енергоносія при заданому тепловому навантаженні установки.

Розглянуто кореляційно-екстремальну САК енергетичною ефективністю установок, що спалюють вторинні енергоресурси. Це дозволяє забезпечувати максимальну енергетичну ефективність при згоранні утилізованої сировини [73].

Досліджено каскадну систему підтримки рівня шихти в установці піролізу [74], яка відрізняється зміною структури системи управління в залежності від знаку зміни кількості сировини, що переробляється, щодо попереднього її значення, а також введення моделі обчислення рівня в залежності від витрати енергетичного ресурсу.

Розглянута САК утилізаційним котлом, де в якості палива використовуються синтез-газ, отриманий в печі піролізу [75]. Проведено аналіз основних видів утилізаційних установок, що працюють на продуктах термічної переробки. Описано процес модернізації утилізаційної установки для роботи на вторинних енергетичних продуктах, також показано вимоги для розробки системи керування. Розроблено структурну схему системи управління і наведені особливості роботи системи і завдання, які виникали в процесі розробки. Встановлена залежність між подачею повітря і синтез-газу для стабільної роботи і зроблено висновок, про те, що залежність між подачею повітря і якістю синтез-газу впливає на надійність роботи установки, що доведено представленим алгоритмом роботи.

Запропоновано розв'язання задачі побудови АСР витратою палива для ТЕЦ з поперечними зв'язками, яка працює на синтетичному паливі [76]. Пропонується математична модель в кінцево-різницевого представленні об'єкту керування у вигляді діючої енергетичної установки. Побудовано і досліджено керуючі програми для мікроконтролерів.

Представлено функціональну структуру системи автоматичного регулювання повітряним трактом водогрійного котла [77]. Наведено результати дослідження стійкості та якості роботи системи автоматичного розрядження в топці. Визначено структуру АСР і оптимальні значення параметрів налаштувань її регуляторів.

Розглянуто САР основних параметрів парового котла теплової електростанції на основі багатовимірною чіткого логічного регулятора, яка дозволяє підвищити ефективність процесу горіння [78]. Компенсація взаємовпливу контурів регулювання реалізована додатковою системою правил нечіткої логіки, які зв'язують контур регулювання з іншими його контурами. Компенсуюча система отримана на основі експериментів на реальному об'єкті управління (енерго-утилізаційне обладнання).

Запропонована модель відноситься до САР утилізаційними установками і може використовуватися для автоматичного керування енерготехнологічними установками, зокрема для задач регулювання рівня сировини при його спалюванні [79]. Модель розширює функціональні можливості САР в разі істотної зміни параметрів об'єкта і наявності збурень при відносно простій реалізації контуру керування.

Наведено результати розробки, дослідження та впровадження вдосконалених САУ процесами спалювання синтетичного та несертифікованого палива [80]. Системи призначені для котельних установок, які працюють на різних видах палива, отриманих з продуктів переробки сировини. Їх застосування дозволяє забезпечити максимальну ефективність утилізації ТПВ і мінімізацію шкідливого впливу газів, що відходять в навколишнє середовище. Така САУ забезпечує автоматичний пуск і зупинку енергетичного устаткування, безперервний контроль технологічних параметрів, захист від аварійних режимів і регулювання подачі палива, повітря, розрідження в топці.

Наведено дослідження задачі синтезу САУ для утилізаційної установки [81]. Розглянуто спрощена модель теплопередачі, для якої з урахуванням можливості вимірювання проміжної змінної пропонується формувати каскадне керування. Показано, що у внутрішньому контурі досить застосування типового П-регулятора. Параметри зовнішнього контуру теплопередачі нестаціонарні і суттєво залежать від навантаження на утилізаційну установку, тому пропонується використовувати ПІД-регулятор.

В роботі [82] запропоновано оптимальні режими керування горінням в енергетичному устаткуванні. Для підтримки оптимальних режимів горіння палива пропонується використовувати екстремальний регулятор, який веде пошук найкращого рішення за параметрами регулювання для регулятора витрати повітря, за умовою, що для генерації заданої кількості тепла, енергетична установка буде споживати мінімальну кількість синтетичного палива. Представлені результати випробування розробленої чисельної імітаційної динамічної нелінійної моделі енергетичної установки з автоматизованою системою регулювання з використанням екстремального регулятора. Принциповий висновок, який зроблено в роботі [82], свідчить про практичну можливість регулювання навантаженням установкою з одночасною оптимізацією режимів горіння при змінах теплоти згорання синтетичного палива та підкреслюється можливість про відмову застосування штатних аналізаторів газів, що утворюються.

Розглянуто спосіб автоматичної оптимізації процесу горіння в печі піролізу на основі коефіцієнту корисної дії такої установки, що дозволяє знизити інерційність процесом автоматичного регулювання та стабілізувати економічність горіння [83]. Наведено метод пошуку оптимального значення коефіцієнту корисної дії.

Розглянута задача оптимізації режимів енергетичних котлів на основі суміші газів, які отримано при переробці ТПВ з нестабільністю теплотвірної здатності [84]. Запропоновано метод динамічного факторного аналізу процесів горіння, що дозволяє оцінювати поточну теплотвірну здатність. Для цього пропонується використовувати наступні контури автоматичного регулювання: по подачі вихідних паливних ресурсів, повітря, розрідженню в топці і вихідних режимних параметрах. Запропоновано систему екстремального регулятора подачі повітря і розрідження в топці за критерієм максимуму ККД котла. Наведені структури АСР можуть бути використані в енерготехнологічних

процесах більш широкого класу, де в основі теплотехнічних процесів лежить утворення синтетичного палива.

У [85] пропонується багатозв'язна система оптимального регулювання економічності споживання палива для енергетичного устаткування. Пропонується мінімізувати споживання палива за рахунок стабілізації режимних параметрів і корекції подачі повітря за критерієм максимуму динамічної ефективності.

Практично всі технічні системи містять нелінійності і невизначеності, тому при вирішенні завдань керування існує складність застосування класичної теорії автоматичного керування і, як наслідок, для цього застосовують системи адаптивного керування з самоорганізацією або саморегуляцією. Розглянуто технологічну схему енергетичної утилізаційної установки і наведені її керовані параметри [86]. Розглядається рішення задачі дослідження систем автоматичної оптимізації з використанням методу статистичного імітаційного моделювання. Наведено структуру імітаційної моделі, яка містить наступні компоненти: модель об'єкта керування, генератор випадкових збурень, модуль прийняття рішень, а також процедуру збору статистики для оцінки якості керування. Представлено алгоритм функціонування імітаційної моделі системи, алгоритм вибору параметрів системи автоматичної оптимізації.

Розраховані показники енергетичних втрат установки та досліджено основні параметри, що впливають на економічність її експлуатації [87]. Розроблено модель мінімізації енергетичних втрат енергетичного обладнання з можливим впровадженням її в АСУ ТП.

Розроблена складна математична модель динаміки енергетичної установки з використанням автоматичної системи управління [88]. Модель доповнена основними схемами управління з типовими завадостійкими алгоритмами управління. Визначено основні взаємозв'язки між ланцюгами управління та досліджено динаміку їх взаємодії. Представлені результати моделювання найважливіших технологічних параметрів у вигляді перехідних процесів.

Розглядається актуальне питання оптимізації роботи теплоелектростанцій [89,90]. Завданням є управління станціями в такому режимі, щоб при найвищій генерації тепла можна було б отримувати найвищу економічну ефективність. Додатково розглянуто спосіб тривалого безперервного автоматичного визначення залишкового ресурсу елементів котла, який працює під тиском як складової частини загальної системи діагностики [89]. Розглянуті особливості оптимізації параметрів системи управління паровим котлом методом повного перебору з використанням системи комп'ютерної математики [91].

Розглянуто математичну модель парового котлоагрегату з турбінним наддувом, який використовується в якості корабельної силової установки, яка складена в системі рівнянь динаміки турбокомпресора, матеріального і теплового балансу газоповітряного тракту котла [92]. Модель призначена для налаштування системи керування котла з регуляторами подачі палива, витрати повітря і пари.

Досліджено необхідний запас стійкості систем регулювання інерційних об'єктів в умовах зміни режиму роботи технологічного обладнання [93]. Запропоновано їх структурні рішення, наведені методики налаштувань. Виконано імітаційне моделювання перехідних процесів, проведені розрахунок і порівняння показників якості регулювання. Застосування такої методики дозволяє забезпечити достатній запас стійкості при збереженні високої якості функціонування систем регулювання.

Проведено аналіз систем автоматичного керування котельними [94], результати порівняння характеристик шаф автоматики для керування паровими котлами типу ДЕ показали їх відповідність сучасним вимогам безпеки та ефективності. Показано необхідність і ефективність використання систем диспетчеризації для територіально розподілених об'єктів.

Розглянуто якість функціонування цифрових регуляторів двох типів [95]. Перший – 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. Виконавчий механізм – клапан, керований реверсивним електродвигуном.

Запропоновано програмну реалізацію нечіткого регулятора для системи керування утилізаційною установкою з метою адаптації ПІД-регулятора на основі чітких терм-множин [96]. 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 [97] 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 [98] проведено дослідження впливу відносної сталої часу об'єкта, що змінюється в широких границях, на якість регулювання температури перегрітої пари за котлом 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 [99] з ПІ-регулятором у зовнішньому контурі з введенням функціональної складової сигналу неузгодженості зовнішнього

контур і від'ємним зворотним зв'язком по сигналу неузгодженості між завданням по витраті пари і сигналом витрати пари на виході котла у внутрішньому контурі.

Присвячена робота питанням побудови адаптивних і стійких систем керування різними технічними системами, які функціонують в умовах невизначеності [100]. Розглядаються питання аналізу, проектування, дослідження і практичного застосування систем керування, отриманих по критерію надлишкової стійкості.

Наведено загальний принцип енергозберігаючого керування паровими котлами теплових електростанцій [101]. У функціональні залежності і вихідні моделі керування котельною установкою включено параметри активатора горіння, який поліпшує процес спалювання низькосортних палив. Показано спосіб підвищення точності вимірювання та регулювання подачі твердого палива в топку котла теплових електростанцій. Розроблено систему автоматичного регулювання подачі активаторів горіння, яка заснована на визначенні якості і кількості палива, яке подається.

Показано, що паровий котел є складним об'єктом, кожен контур якого має хоча б одну ланку, спільну з іншим контуром регулювання [102]. Запропонована систем керування параметрами, які синтезовано на базі принципів автономності та інваріантності. Запропоновано метод синтезу коригування зв'язку регуляторів двічі зв'язаної системи, яка може бути використана при дослідженні систем на стійкість, керованість, спостережливість і якість перехідних процесів.

Викладаються результати роботи по автоматизації керування процесом горіння палива в котельній установці, пропонуються шляхи підвищення ефективності процесу горіння на основі екстремального керування [103].

В [104] наведено результати досліджень у сфері математичного моделювання теплових процесів котельного агрегату. Представлено математичну модель керування температурою перегрітої пари котельного агрегату. Встановлено, що система керування адекватно реагує на збурення і

відновлює задану температуру перегрітої пари, змінюючи при цьому необхідні параметри системи.

Метою досліджень в [105] була розробка системи керування, що забезпечує підвищення точності регулювання витратою газу і необхідних показників температури перегрітої пари в умовах функціонування котельного агрегату шляхом розробки системи автоматичного регулювання витрат газу в топці котельного агрегату.

Розглядаються технологічні схеми функціонування парових котлів [106]. На їх основі виконується змістовний опис процесів функціонування та ставляться завдання керування технологічним процесом в барабанному і прямоточному парових котлах.

Представлено рішення [107] з багатовимірною регулювання теплового навантаження котла та використанню в якості автоматичних регуляторів тих, що відновлюють та прогнозують АСР з врахуванням особливостей парового котла як об'єкта автоматизації. Наводиться опис розробленої на сучасних технічних і програмних засобах системи керування котлом теплової станції.

Запропоновано метод попереджувального керування складними технологічними комплексами за критеріями енергетичної ефективності на основі моделей зворотної динаміки [108]. Запропоновано підхід до побудови зворотніх моделей динаміки технологічних об'єктів керування в умовах завад з використанням методу експоненціальної фільтрації. Наведено приклад побудови адаптивної системи регулювання подачі повітря в паровий котел за критерієм максимуму ККД процесів горіння.

Розглядаються завдання керування технологічним процесом в барабанному і прямоточному парових котлах [109]. Пропонується завдання теоретичної моделі у вигляді функцій переходів і функції виходів для моделювання технологічних процесів. Пропонується модель керування водно-хімічним режимом при нечіткому завданні параметрів.

Розглянуті роботи показали, що типовим підходом до вирішення даного завдання є використання газо-аналітичних приладів в якості первинних вимірювальних датчиків в контурах регулювання подачі повітря і палива та використання адаптивних систем керування за показниками ефективності.

Для розглянутого класу систем керування застосування газо-аналітичних приладів ускладняється тим, що вторинні енергетичні ресурси містять у своєму складі агресивні компоненти, які призводять до прискореного зносу первинних приладів і виходу їх з ладу. Адаптивні системи керування ґрунтуються на використанні в якості цільової функції керування непрямих показників ефективності топкових процесів. Це пов'язано з тим, що вимір поточного ККД топкових процесів в умовах високого рівня перешкод являє собою некоректно поставлене завдання ідентифікації. При цьому наявність випадкових збурень призводить до більших помилок оцінювання і, як наслідок, до зниження точності і швидкодії контуру адаптивного керування [110].

1.6 Постановка завдань дослідження

Наразі немає єдиного методу оптимального управління процесом спалювання вуглеводневого газу невідомого складу. Це зумовлено різними потребами технологічного продукту, який одержується в подальшому: спалювання для енергетичних потреб, застосування в якості нафтохімічної сировини або використання отриманого продукту в металургійній технології.

Використання будь-яких видів екстремальних регуляторів має загальний недолік, який залежить від виду екстремальної характеристики. При наближенні до точки екстремуму градієнт вимірюваного параметра з прийнятою обчислювальною похибкою зменшується до нуля. Це відбувається як у випадку визначення максимальної температури при горінні [111], так і у випадку визначення максимальної температури теплоносія [112]. Аналогічна властивість градієнта вимірюваного параметра виникає і при визначенні мінімальної

концентрації окису вуглецю (CO) при мінімальній концентрації кисню в димових газах, коли останнє значення наближається до нуля [113]. З урахуванням наявності порога чутливості і похибок систем вимірювання та регулювання в точці екстремуму виникають великі похибки визначення величини, пошук якої здійснюється. Шуми вимірювальних каналів так само вносять негативний вплив на точність визначення такої величини. Як наслідок, в околиці точки екстремуму утворюється максимальна похибка вимірювання, що істотно ускладнює, а в низці випадків робить неможливим використання екстремальних регуляторів для управління спалюванням палива змінного складу.

Можливе використання газових аналізаторів для ідентифікації компонентів в невідомих газових сумішах. В подальшому ідентифіковані суміші використовують при спалюванні в енергетичних цілях або ідентифіковані компоненти використовують для перетворення в хімічних технологіях вуглеводневих газів. У таких випадках з'являється можливість організації процесів управління, які не мають екстремальних характеристик. Для прикладу можна привести піч безокисного нагріву [114] або реактори органічного синтезу.

З метою встановлення якісного і кількісного складу газу розрізняють хімічні, фізико-хімічні та фізичні методи. Відомі переваги фізико-хімічних і фізичних методів перед хімічними - швидкість виконання, можливість автоматизації аналізу – зробили можливим їх більш широке поширення. Наразі найбільш широке застосування знаходять методи газової хроматографії [115]. Основними недоліками цих приладів є послідовний вимір компонентів газу, тривалий час аналізу.

З появою невеликих, надійних лазерних джерел і високочутливих багатоканальних фотоприймачів з'явилися газоаналізатори, засновані на використанні спонтанної рамановської спектроскопії (spontaneous Raman spectroscopy) [116], хоча до теперішнього часу такі

газоаналізатори знаходяться на стадії дослідно-промислових розробок. Крім того, такі пристрої вимагають висококваліфікованого обслуговування.

Велика частина розрахунків параметрів процесів горіння виконується на основі методів хімічної кінетики через визначення наведеної формули суміші як окремої речовини [117]. При використанні такого підходу для розгляду процесу горіння суміші газів розраховується ентальпія і визначається брутто-формула. Така задача є зворотною і некоректно поставленою.

Не існує єдиного методу вирішення всього різноманіття зворотніх некоректно поставлених задач. Кожен їх вид вимагає індивідуального підходу. Це ускладнює або навіть виключає використання існуючих методів рішення в автоматичному регуляторі визначення брутто-формули пального змінного складу. Крім того, склад пального може багаторазово випадково змінюватися протягом будь-якого проміжку часу, що характерно для синтез-газу отриманого при термічній переробці ТПВ. Це спричиняє необхідність оперативного багаторазового отримання рішення задачі. Що призводить до необхідності розробки нового методу розв'язання оберненої і некоректно поставленої задачі.

Одним із шляхів вирішення проблеми, пов'язаної зі зміною складу речовини органічного походження, яку термічно переробляють, є сортування ТПВ з метою гомогенізації складу фракцій. Але навіть в країнах, де найкращим чином розвинена система збору та переробки ТПВ (Швеція) існує проблема його сортування [118]. Склад сортованих відходів може змінюватися в залежності від регіону його збору або пори року. Відсутність в більшості місць налагодженої системи сортування органічних відходів є стримуючим фактором їх переробки. Скрутне становище з переробкою відсортованих відходів у розвинених країнах підтверджується і незалежним дослідженням The Guardian [119]. У США кількість відсортованих пластикових відходів, що відправляються на вторинну переробку визначено лише в 5%. Решта відправляється на полігони складування. Така ситуація склалася після відмови Китаю з 2017 року в імпорті для переробки відходів з США внаслідок поганого сортування. За твердженням

TheWashingtonPost [120], за таких умов до 2030 року США зіткнуться з дефіцитом переробних потужностей для 37 млн. тонн ТПВ. З наведених даних випливає, що і в попередні роки сортовані відходи в основному не перероблялися, а вивозилися з країни. Схожа ситуація складається і в європейських країнах. Так, Німеччина справедливо займає лідируюче місце в Європі зі сортування і переробки відходів. Офіційна вимога до переробки пластикових відходів складала 36% від їх загальної кількості. Але в їх число входив пластик, який було відсортовано для вивезення в Китай. За оцінкою BDE (Федеральне об'єднання німецьких підприємств зі збору та переробки відходів) [121] з 2017 по 2018 рік обсяг ввезених в Китай пластикових відходів впав на 95 відсотків: з 340 тисяч до 16 тисяч тонн. Дорожня карта Європейського союзу з утилізації ТПВ передбачає до 2035 складування на полігонах не більш ніж 10% від їх об'єму. Решта має перероблятися або спалюватися. Spiegel [1] відзначає, що в даний момент тільки 16% пластикових відходів піддається вторинній переробці.

До складу побутових відходів, крім будь яких типів пластиків, входять і біорозкладні компоненти. Одним із способів їх утилізації може виступати компостування. Але і в цьому випадку основною проблемою є сортування і поділ на складові, які розкладаються і не розкладаються. В [122], крім компостування, для утилізації органічної частини (харчових відходів ТПВ) пропонується анаеробне зброджування. Такий висновок зроблено на основі екологічної чистоти і економічності такого методу. Слід врахувати, що аналіз проводився з урахуванням великої кількості параметрів: забруднення повітря, вартість, побічні продукти, потужність, комерційна привабливість, енергоефективність і тип оброблюваних відходів. До того ж зазначено, що основними обмеженнями анаеробного зброджування є його низька ефективність виробництва енергії і обмежені можливості з переробки відходів. Так, до 70% горючих газів, що утворюються, витрачається на підтримання параметрів процесу зброджування. Крім того, тільки частина органічних відходів може бути піддана

біорозкладанню. Водночас швидкість розкладання для різних речовин різна. Не всі відходи з біорозкладеної групи раціонально з економічної точки зору використовувати при анаеробному зброджуванні. Але саме два останніх параметра, що виступають як обмеження, є найбільш важливими при виробленні альтернативних видів палива. Крім того, процес анаеробного зброджування погано піддається управлінню з точки зору кількості газів, що виробляються на одиниці встановленого обладнання.

Переробка органічних відходів ТПВ, які біологічно не розкладаються або погано розкладаються, вважається найбільш брудним способом їх термічної утилізації [123]. Як заміну спалюванню переробка в установках двохстадійного піролізу вважається ефективною з подальшою можливістю використання отриманих горючих газів в керованих процесах. Крім того, цей процес енергетично більш ефективний у порівнянні з анаеробним зброджуванням. На підтримку параметрів процесу піролізу досить лише 10%, які утворюються. В межах піролізу можна виділити два його типу: швидкий і повільний. Швидкий піроліз характеризується великим виходом рідкої фракції при певній кількості вуглистого залишку і газової фази. Може бути організовано накопичення і зберігання протягом значного проміжку часу рідкої і твердої фаз продуктів реакції. Цей проміжок часу може бути використаний для визначення складу отриманих продуктів. Як наслідок, з'являється можливість організації їх керованої переробки. Обмежуючим фактором є відсутність обґрунтованої технології швидкого піролізу промислового масштабу.

Процес повільного піролізу технологічно відомий і більш відпрацьований. Велика частина продуктів реакції знаходиться в газовій фазі. Внаслідок цього вони повинні бути використані відразу після утворення. Крім того, в більшості випадків робота обладнання при повільному піролізі носить циклічний характер зі зміною складу робочої речовини протягом циклу. Це веде до зміни складу продуктів реакції. Ще одним фактором, що впливає на кількісне співвідношення речовин в суміші продуктів реакції, є вологість вихідних продуктів. На даний

момент виділені особливості для організації керованого процесу використання продуктів повільного піролізу вимагають фіксованого та відомого складу вихідної сировини. Виділяють низько- і високотемпературний повільний піроліз. Як показують теоретичні [2] і експериментальні [3] дослідження, з ростом температури процесу збільшується вихід горючої газоподібної фази. При високій температурі ($\sim 1500^{\circ}\text{C}$) і наявності необхідної кількості парів води маса вуглистою залишку і фази, які конденсується, можуть бути зведені до мінімуму. В результаті цього буде отримано максимальна кількість продукт-газу. Велика вологість вихідної сировини або цілеспрямоване введення води в зону реакції вимагає збільшення витрати енергоносія на підтримання необхідної температури процесу.

У багатьох випадках піроліз розглядається як процес термічного розкладання органічних речовин без доступу повітря. До того ж в якості енергоносія для зовнішнього обігріву реакційної зони використовуються різні види пального. Піроліз слід розглядати як процес розкладання при нестачі повітря [124], як окремий випадок процесу газифікації органічних речовин і, в ще більш широким межах, як спалювання при нестачі повітря [125]. При такому підході з'являється можливість переходу від зовнішнього обігріву до внутрішнього за рахунок використання енергії, що виділяється в процесі піролізу (газифікації, горіння при малому коефіцієнті надлишку окиснювача). У результаті потенційно, крім економії пального, можуть бути забезпечені рівномірне прогрівання реакційної зони при відсутності теплопередавальних поверхонь та організація безперервного і регульованого процесу за умови контрольованої подачі компонентів.

Організація такого способу піролізу стримується невизначеністю і зміною в часі складу вихідної сировини, а також, у багатьох випадках, її високою вологістю. При підвищеному вологовмісті процес газифікації може бути організований на основі методу фільтраційного горіння в нададіабатичному режимі [4]. Такий процес дозволяє спалювати органічні речовини ПТВ низької

калорійності або проводити його таким чином, щоб до 95% теплової енергії згорання було перетворено в калорійність продуктів, що утворюються в газовій фазі. Можуть бути перероблені матеріали з низьким вмістом вуглецю (від 10%) та вологістю до 60%. При заданому складі переробляється речовини його газифікація в нададіабатичному режимі дозволяє зменшити витрату паливної складової при одночасному збільшенні температури в реакційній зоні. Як наслідок, збільшується вихід горючих газів при одночасному зменшенні твердого (вуглистого) залишку. Особливістю процесу горіння в нададіабатичному режимі є зустрічний рух вихідної сировини (палива) і фронту горіння разом з його продуктами. Продукти горіння забезпечують сушку сировини і початкове його розкладання до надходження в зону екзотермічної реакції. Як наслідок, в зону реакції не надходить виддалена волога і продукти низькотемпературного розкладання, що зменшує вихід горючих газів. До недоліків також варто віднести неможливість управління витратою продуктів реакції при заданому температурному режимі процесу. Витрата залежить від розміру реактора і складу вихідної сировини.

В роботі [4] запропонований метод визначення в режимі реального часу брутто-формули і теплотвірної здатності газоподібного палива в процесі його спалювання в спеціальному пристрої. В якості вихідних даних використовуються величини заміряних витрат газу і повітря, а також температури продуктів згорання. Такі вимірювання прості і допускають реалізацію в автоматичному режимі. Об'єднання технології піролізу, побудованої на основі методу газифікації в наддіабатичному режимі [5], з методом визначення в режимі реального часу складу продукт-газу [4] створює можливість переробки органічних речовин довільного, змінного складу.

1.7 Висновки до першого розділу

1. Декларація з Охорони навколишнього середовища і розвитку, яку прийнято на Міжнародній конференції ООН в Ріо-де-Жанейро (1992), визначає світову політику щодо безпечної та екологічно прийнятної утилізації ТПВ. Вимоги декларації до технологій переробки ТПВ — ефективність, безпека і екологічність через технології повторного використання, сортування, розділення і утилізації.

В Україні утворилося близько 10 млн тонн ТПВ. Морфологічний склад ТПВ було класифіковано таким чином: харчові відходи — 54,2%, папір і картон — 16,3%, деревина — 3,5%, метали — 4,2%, текстиль — 6,7%, скло — 4,3%, пластмаса — 6,3%. На сьогодні перероблено та утилізовано лише близько 6,6 %, з яких: 2,48 % спалено та 4,18 % потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та заводи переробки ТПВ, всі інші були захоронені чи вивезені на сміттєзвалища.

2. Доведено, що енергетична переробка є ефективним способом утилізації відходів, тому що їх обсяг зменшується на порядок і є можливість отримувати теплову енергію і, як наслідок, шкідливе навантаження на навколишнє середовище мінімізується. Завдяки цим факторам найбільшого поширення набули термічні способи утилізації ТПВ.

До технологій енергетичної переробки ТПВ відносяться: піроліз, спалювання на механічних колосникових решітках в шарових топках, спалювання в киплячому шарі, спалювання в барабанних печах, спалювання в металургійних печах. Існує технологія, де ТПВ використовують в якості додаткового палива для випалу клінкеру в цементних печах.

Європейським законодавством запропонована формула оцінки енергетичної ефективності установок, в яких відбувається процес термічної переробки ТПВ з метою вироблення теплової або електричної енергії для відпускання споживачеві. Така величина не характеризує термодинамічну

ефективність, тому через ефективність перетворення при відпусканні електроенергії і тепла ця величина в низці випадків може бути більше 1.

3. Під впливом температур при неповному спалюванні утворюються високотоксичні органічні сполуки. В процесі піролізу відходів виділяються особливо небезпечні шкідливі та отруйні речовини: зола і пил, на поверхнях яких абсорбовані важкі метали; фосген (COCl_2); діоксини ($\text{C}_{12}\text{H}_4\text{Cl}_4\text{O}_2$); фурани ($\text{C}_{12}\text{H}_4\text{Cl}_4\text{O}$); фосгеноксим (CCl_2NOH); хлорацетофенон ($\text{C}_6\text{H}_5\text{COCH}_2\text{Cl}$); хлорпикрин (Cl_3CNO_2); хлорціан (ClCN) та ін., причому більшість з них утворюється через нестачу окиснювача, необхідного для протікання процесу піролізу.

Аналіз термічних способів утилізації показав їх суттєві переваги. Токсичні органічні компоненти піддаються повному окисненню, а мінеральні складові залишаються в твердих продуктах розплаву. Однак при спалюванні в газову фазу переходять сполуки ртуті, свинцю, кадмію і діоксини. З'єднання неорганічних речовин з хлором, фтором, важкими металами залишається в золі з підвищеною концентрацією вмісту. Крім того, утворюються газоподібні речовини, що містять хлор, фосфор, сірку, фтор, в результаті утворюються оксиди і кислоти HCl , HF , SO_3 , P_2O_5 .

4. При термічній утилізації ТПВ потрібно виконувати головне завдання, яке полягає в прийнятних обсягах викидів у навколишнє природне середовище шкідливих сполук, що утворюються. Це можливо виконати лише за умови впровадження вискоелективних технологій очищення продуктів переробки і використання автоматизованих систем керування і контролю над таким технологічними процесами.

РОЗДІЛ 2 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТПВ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Для виконання завдань дисертаційного дослідження в розділі буде розроблена та обґрунтована імітаційної модель ТПВ, в основу розробки якої покладено метод обчислення умовної формули, що дозволить ввести класифікаційні ознаки [7]. Класифікація ТПВ дасть змогу розробити основні технологічні прийоми для схеми термічної переробки за рахунок використання технології піролізу.

Завдання дослідження буде виконуватись у такій послідовності. По-перше, буде здійснено класифікацію ТПВ за якісним складом елементів, яка буде проведена при імітаційному моделюванні різних груп за прийнятими інформаційними ознаками. По-друге, будуть вивчені існуючі технологічні схеми термічної переробки ТПВ на установках піролізу з аналізом їх переваг і недоліків. В подальшому буде визначений метод і технологія виведення сполук Cl, S і F при піролізі ТПВ. І насамкінець, буде розроблено технологічну схему термічної переробки ТПВ установкою піролізу в адіабатичному потоці при фільтраційному горінні.

2.1. Імітаційна модель ТПВ

У роботі [137] пропонується використовувати технологію піролізу для виробництва вуглистого залишку з відходів агросировини, а саме з зброженого залишку біогазової установки. Такий підхід видається найбільш перспективним, оскільки дає змогу збільшити вихід продукт-газа палива і тим самим потенційно збільшити вихід теплової та електричної енергій. В роботі розглядають біогазову установку як джерело біо-газу для газової електростанції і робиться висновок, що логічніше було б спрямувати наступний пошук технології утилізації зброженого залишку на отримання з нього додатково газової складової. Це дозволило б підвищити ефективність процесу на обладнанні, що вже є в наявності. З огляду на те, що технологія піролізу речовин органічної природи

(основних продуктів в СО) достатньо відпрацьована [138] і дозволяє контролювати вихід газової, рідкої і твердої складових, найбільш перспективним бачимо використання технології піролізу для максимального вилучення саме газової складової з відходів переробки агросировини. В даній роботі пропонується прийняти також стратегію використання піролізної установки для отримання продукт-газу. В роботі [139] було запропоновано органічні продукти переробки біотенкової технології представляти умовною формулою.

Розглянемо можливість представляти морфологічний склад ТПВ, який було наведено в таблиці 1.4 також умовною формулою. Для імітаційного моделювання різних груп ТПВ умовною формулою розглянемо моделі, що запропоновані в [140; 141], де в основу покладено відомі масові або об'ємні частки складових частин органічних сполук, а також їх хімічні формули. Для цього запропоновано записувати умовну формула ТПВ у вигляді

$$A_{b_{1T}}^{(1)} A_{b_{2T}}^{(2)} \dots A_{b_{iT}}^{(i)} \dots A_{b_{mT}}^{(m)}, \quad (2.1)$$

де $A^{(i)}$ – символ i -го хімічного елемента; b_{iT} – кількість атомів i -го хімічного елемента в умовній молекулі ТПВ.

Незважаючи на таке різноманіття органічних речовин і сполук, їх визначення може бути описано за допомогою єдиної моделі. Визначимо модель на прикладі целюлози, що включає до свого складу атоми [C], [H], [O]. Целюлоза є представником кисневмісних вуглеводнів, що охоплюють широкий клас органічних сполук. Так, додаткове врахування всього лише двох елементів [S] і [N], що зустрічаються в ТПВ в менших кількостях, дозволяє змоделювати майже всі органічні сполуки, які є складовими ТПВ. Виходячи з умов побудови моделі, немає необхідності враховувати структуру даної речовини. В цьому випадку умовна формула віскози має вигляд

$$C_{b_C} H_{b_H} O_{b_O}. \quad (2.2)$$

Тут b_C , b_H , b_O – кількість відповідних атомів в умовній формулі пального. Для целюлози

$$b_C=6, b_H=10, b_O=5. \quad (2.3)$$

В подальшому для зменшення кількості невідомих аргументів при розрахунках сполук, що утворюються, розрахунки проводять на один атом вуглецю і тому остаточно умовна формула целюлози має вигляд $\text{C}_{\text{H}_{1,666}\text{O}_{0,833}}$.

З таблиці 1.4 для подальшого аналізу було відібрано лише ТПВ, які можна віднести, виходячи з хімічних формул цих сполук до класу органічних речовин. У результаті аналізу було сформовано чотири групи ТПВ за такими ознаками: вуглеводневі, вуглеводневі ті, що містять кисень, вуглеводневі ті, що містять кисень та азот та вуглеводневі ті, що містять активні елементи. За правилом подання інформації у вигляді умовної формули, всі хімічні елементи розраховуються на один атом вуглецю. Отриману класифікацію представлено в таблиці 2.1.

Для більшого розуміння наведеної класифікації нижче наведені деякі органічні сполуки у вигляді хімічних формул. Харчові відходи мають протеїн ($\text{NH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$), умовна формула ($\text{H}_5\text{C}_2\text{O}_2\text{N}$) і жир ($\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$), умовна формула ($\text{H}_{32}\text{C}_{16}\text{O}_2$). Папір та картон складається з целюлози ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)_x, а це є природний полімер, полісахарид, волокниста речовина, головна складова частина оболонки рослинних клітин.

Поліетилентерефталат (ПЕТФ, також поліестер, дакрон, майлар, лавсан) — термопласт, найпоширеніший представник класу поліестерів, відомий під різними назвами. ПЕТФ $[-(\text{OC})\text{-C}_6\text{H}_4\text{-(CO)OCH}_2\text{CH}_2\text{O-}]_n$ — гетеро ланцюговий поліестертерефталевої кислоти[en] $(\text{OH})\text{-(CO)-C}_6\text{H}_4\text{-(CO)-(OH)}$ і етиленгліколю $(\text{OH})\text{-C}_2\text{H}_4\text{-(OH)}$.

Найважливішими штучними волокнами, з яких виготовляється текстиль, є віскозне й ацетатне. Основу першого становить целюлоза $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_3]_n$, а другого - ацетатні естери целюлози (триацетат $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OCOCH}_3)_3]_n$).

Таблиця 2.1

Класифікований морфологічний склад ТПВ через представлення умовною формулою.

№/№	Сформована рупа ТПВ	Назва ТПВ	Умовна формула ТПВ, базовий склад елементів С, Н, О, N	Присутність активних елементів
1	Вуглеводневі	Поліетиленна плівка	$(CH_2)_n$	
		Поліпропілен елементи конструкцій	$(CH_2)_n$	
		Поліістиренні елементи конструкцій	$(CH)_n$	
2	Вуглеводневі ті, що містять кисень	Штучний текстиль. Триацетат целюлози	$(CH_{1,777}O_{0,888})_n$	
		Папір	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		Картон	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		Упаковка	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		Деревина	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		ПЕТФ тара	$CH_{0,8}O_{0,4}$	
		Штучний текстиль. Віскоза	$(C_6H_{2,166}O_{0,833})_n$	
3	Вуглеводневі ті, що містять кисень та азот	Харчові відходи	$CH_{2,055}O_{0,222}N_{0,055}$	
		Штучний текстиль найлон- 66	$(CH_{1,8332}O_{0,166}N_{0,166})_n$	
		Вовна	$CH_{2,5}ON_{0,5}$	
		Шкіра	$CH_{1,5}O_{0,312}N_{0,25}$	
		Залишок органіки	$CH_{2,5}ON_{0,5}$	
4	Вуглеводневі ті, що містять активні елементи	Полихлорвинильні елементи конструкцій	$(C_1H_{1,5}Cl_{0,5})_n$	Cl
		Вініліденфторидні елементи конструкцій	$(CHF_2)_n$	F
		Гума, в тому числі автомобільна	$(CH_{1,777}S_{0,444})_n$	S

Крім того, до штучного текстилю відносять нейлон. Існують два види нейлону: полігексаметиленадипінамід (найлон-66 або поліамід 66), хімічна формула має вид: $[-OC-(CH_2)_4-CO-NH-(CH_2)_6-NH-]_n$. і полі-ε-капроамід чи капрон сімейство синтетичних поліамідів, формула з аніда: $[—HN(CH_2)_6NHOC(CH_2)_4CO—]_n$.

Те, що в побутовому житті називають пластмаси, то, як правило, поліхлорвініл і фторолефін. Полівінілхлорид або поліхлорвініл, поліхлорвінілова смола — безбарвна, прозора пластмаса, термопластичний полімер, продукт полімеризаціїхлорвінілу $CH_2=CHCl$. 1-дифторетилен або вініліденфториду - речовина, що відноситься до фторолефінов - алкенам, в яких один або кілька атомів водню заміщені атомами фтору. Є ненасиченою фторорганічною сполукою і служить в якості мономера для синтезу термостійких і хімічно стійких полімерів і сополімерів (фторопластов і фторкаучуків), його хімічна формула має вигляд $(C_2H_2F_2)_n$.

Гума — речовина вулканізації композицій на основі каучуку. Для виготовлення гуми каучук слід переробити, додавши до нього сірку. Її хімічна формула має вигляд $(—CH_2—C_2H_3S—CHS—(CH_2)_2—C_2H_3S—CHS—CH_2—)_n$.

Шкіра — це речовина, яка в своєму складі на 97% складається з білка протеїну, його приведена формула $C_{16}H_{24}N_4O_5$. Вовна — сімейство речовин, які в своєму складі на 98% складаються з фібрилярних білків, що характеризує їх механічну міцність. Переважно з кератинів складаються рогові похідні епідермісу шкіри. Відповідно до їх молекулярної конформаціїα-спіралі і β-листарозрізняють α- і β-кератиніїх приведена формула $C_4H_{10}N_2O_4$.

2.2. Існуючі технологічні схеми термічної переробки ТПВ на піролізних установках.

Піролізу піддається частина ТПВ, яку неможливо компостувати, ця частина включає гуму, шкіру, пластмасу, дерево і т.і. [142, 143]. Схему піролізу непідготовлених ТПВ показано на рис. 2.1, а на рис. 2.2 показано технологічну

схему піролізу попередньо підготовлених ТПВ. Піроліз або деструктивна перегонка являє собою процес термічного розкладання ТПВ без доступу або при суттєвій нестачі кисню повітря, в результаті якого відбувається розщеплення органічної маси, рекомбінація продуктів розщеплення з утворенням речовин, які термодинамічно стабільні, а саме: вугільного залишку, рідких смол і продукт-газу. В результаті термічного впливу на ТПВ, за рахунок їх розкладу (в органічній речовині рвуться хімічні зв'язки, які утворювали довгі полімолекули або довгі органічні сполуки) і синтезу нових речовин. Обидві стадії процесу піролізу взаємопов'язані і тривають одночасно. Водночас в певний проміжок часу в залежності від температури і часу може зміщуватися тривалість реакцій в ту або іншу сторону. Кількість і склад продуктів піролізу залежить від складу ТПВ і температури розкладання. Загальна схема технології піролізу попередньо непідготовлених ТПВ представлена на рис. 2.1.

Непідготовлені ТПВ надходять на дробильну установку (4), далі в приймальний бункер підготовленого ТПВ (3) установки піролізу. Для безперебійної роботи установки піролізу необхідний стійкий запас дробленого ТПВ, яке зберігають. З приймального дозуючого бункера ТПВ подають в проміжний бункер (2), днищем якого служить пластинчастий живильник, призначений для завантаження ТПВ в піч піролізу (1). У печі піролізу при температурі 550...650°C без доступу повітря відбувається піроліз ТПВ. В результаті утворюється газова суміш, яка містить в своєму складі продукт-газ, що утворився, кислі гази, пари смол і твердий вуглецевмісний продукт - вуглецевий залишок [142, 143].

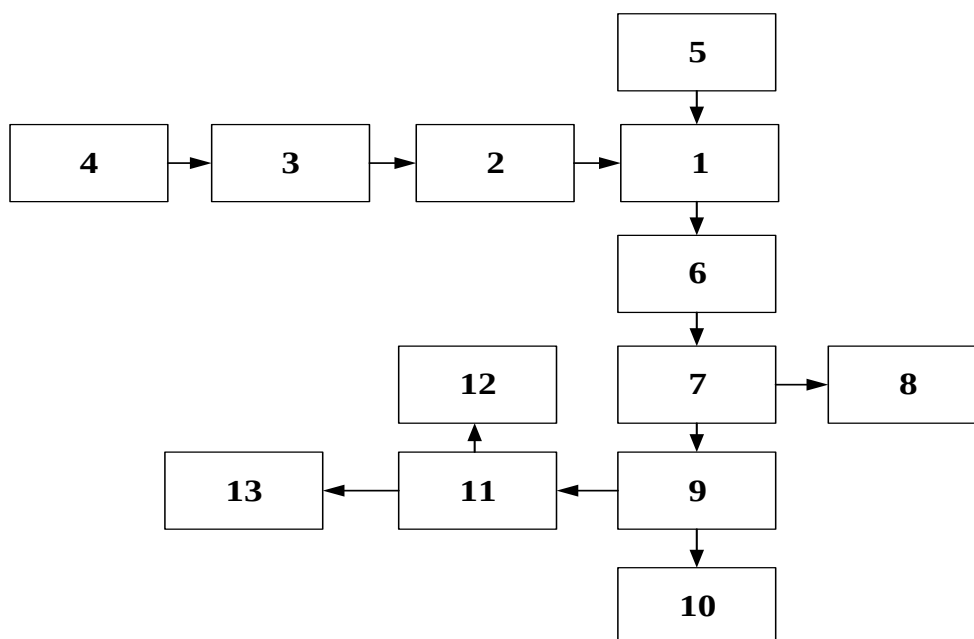


Рис. 2.1. Схема термічної переробки непідготовлених ТПВ технологією піролізу.

(1 - піч піролізу, 2 - дозуючий бункер, 3 - бункер підготовленого ТПВ, 4 - дробильна установка, 5 - камера для спалювання, 6 - холодильний барабан охолодження вуглистого залишку, 7 - електромагнітний сепаратор, 8 - бункер чорного металу, 9 - млин сепаратор матеріалів, 10 - бункер силікатних матеріалів, 11- мокрий сепаратор-мельниця вуглистого залишку і кольорових металів, 12 - бункер кольорового металу, 13 - бункер вуглистого залишку.)

Для регенерації тепла горіння вуглеводнів і перетворення активних хімічних речовин в хімічно пасивні сполуки передбачають їх спалювання в спеціальній камері (5) при температурі 1200°C при витраті продукт-газу, який відходить від печі. Отриманий в печі вуглистий залишок з температурою 450...500°C у відсутності окиснювача надходить в холодильний барабан (6), де охолоджується до 40...50°C, і далі по стрічковому конвеєру подається на помел, попередньо пройшовши електромагнітний сепаратор (7) для вилучення залишків чорного металу (8), і потім надходить на мельницю-сепаратор (9), для відділення силікатних фрагментів ТПВ (10), і далі зазнає мокрого помелу (11). Подрібнені частинки, розміром до 5 мм і менше, надходять на відцентрову сепарацію для

вилучення фрагментів кольорових металів (12), а вуглистий залишок направляють в бункер 13. Відсортовані частки кольорових металів накопичуються в контейнері (12).

Основним недоліком такої технології піролізу з переробки ТПВ є громіздка система фізичного очищення готової продукції. Крім того, не зрозумілим залишається технологічний прийом очищення продукт-газу від кислих газів. З точки зору керування процесом переробки незрозуміло, що є збурюючими факторами, а що є керуючими впливами.

У [144] розглядається універсальна піролізнатехнологія, в основу якої покладена переробка підготовленої сировини. Кожній групі ТПВ відповідає свій процес термічної переробки на піролізній установці, основним елементом якої є піролізна піч (1), що являє собою шахтну піч з вбудованою всередині швельшахтою (рис. 2.2.). Під впливом власної ваги підготовлені ТПВ (*a*) опускаються через швельшахту в нижню частину, де проходить хімічна реакція, куди подається підігріте до 400 °С повітря з підігрівача повітря (6), якого за кількістю недостатньо для повного згорання відходів [7].

Частка вуглецевого залишку, який утворюється від розкладання ТПВ, використовується для формування потрібної температури тривання реакції піролізу в (1), а продукт-газ, пройшовши циклон сепаратор (2) живильним вентилятором (4), подається споживачеві. В цьому відношенні описана технологія нагадує технологію спалювання ТПВ з тією лише різницею, що очищення від пилу не проводиться через утворення високотемпературних газів, для яких знепилювальні установки незастосовні. Отримані в результаті піролізу компоненти продукт-газ і рідкі нафтоподібні продукти (*c*) можуть бути використані для потреб енергетичного устаткування. З циклон-сепаратора (2) в бункер твердих карбонатів і силікатів (3) направляється отримана суміш, яка розділяється від твердих продуктів. Частину отриманого продукт-газа (5)

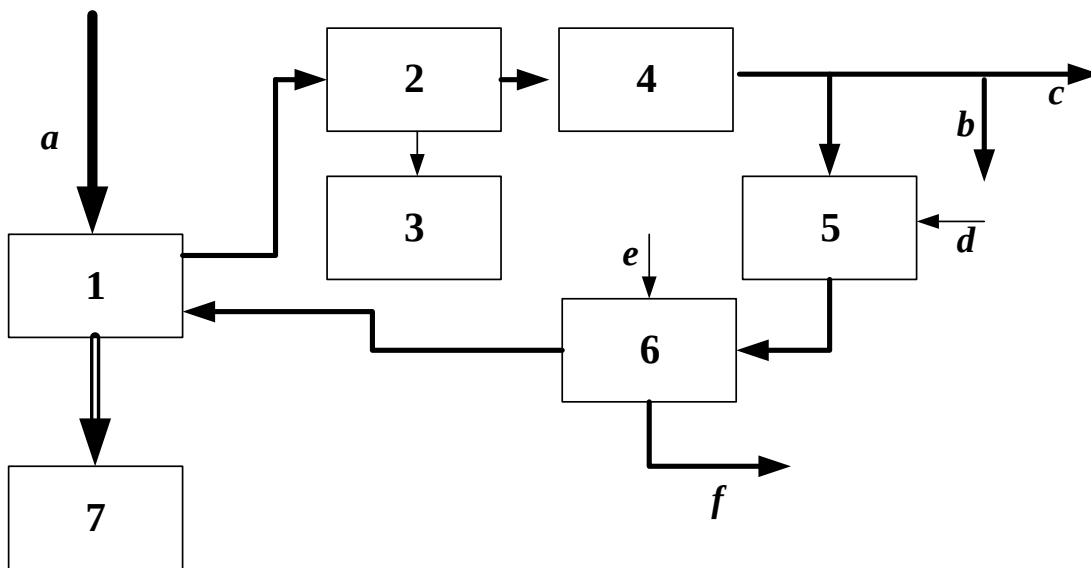


Рис. 2.2. Схема термічної переробки підготовлених ТПВ технологією піролізу.

(1 – піч піролізу, 2 – циклон сепаратор, 3 – бункер твердих карбонатів і силікатів, 4 – живильний вентилятор, 5 – камера спалювання продукт-газу для підігріву повітря, 6 – підігрівач повітря, 7 – бункер шлаку, *a* – підготовлені ТПВ, *b* – продукт-газ на аналіз, *c* – продукт-газ до споживача, *d* – повітря для підігріву, *e* – повітря для регенерації, *f* – димові гази від камера спалювання продукт-газу)

використовують для підігріву повітря (*e*) в (6). Через підігрівач повітря (6) димові гази (*f*) після спалювання продукт-газу в (5) надходять до навколишнього середовища. Із печі (1) шлак, що утворився, направляється в бункер шлаку (7). Дієвим недоліком такої технології є постійна зміна сировини, яка надходить на термічну переробку. Крім того, для регулювання кількості підведеного тепла використовується вуглистий залишок, який по суті спалюється в зоні хімічної реакції. Використання вуглистого залишку збільшує кількість CO_2 в суміші, яку утворює продукт-газ. По суті заздалегідь спроектована установка для постійної переробки ТПВ перетворюється в циклічну, яку кожен раз потрібно налаштовувати під задану групу ТПВ. Як і в попередній схемі, з точки зору

керування процесом переробки незрозуміло, що є збурюючими факторами, а що є керуючими впливами.

Було розглянуто дві принципово відмінні термічні технології піролізу ТПВ. Кожна технологія впроваджена і має як свої недоліки, так і переваги. Єдиним спільним недоліком при переробці ТПВ є утворення в продукт-газі кислих газів. В подальшому потрібно розглянути впроваджені технології їх утилізації.

2.3. Метод і технологія виведення сполук Cl, S і F при піролізі ТПВ.

Останнім часом у країнах ЄС для очищення газоподібних продуктів штучного походження від «кислих» газів найбільшу перевагу віддають сухим методам [145], які поряд з прийнятними інвестиційними та експлуатаційними витратами, а також простою концептуальною схемою установки і компактним обладнанням забезпечують впевнене дотримання вимог, які пред'являються Європейською Директивою 2000/76 / ЄС [146] по викидах шкідливих складових з штучно отриманими газами при термічній утилізації ТПВ.

З урахуванням вищесказаного для очищення газоподібних продуктів згорання ТПВ від «кислих» газів пропонується застосувати систему газоочистки, в основі якої лежить сухий лужний метод. Розглянемо коротко суть такого методу.

Вибір обладнання очистки продукт-газу, встановленого безпосередньо після установки, визначається складом і концентрацією шкідливих речовин на виході з установки, які залежать від характеристик відходів ТПВ та організації процесу їх піролізу. При рухові внутрішніми частинами установки і трубопроводах утворюються газоподібні сполуки сірки, хлору і фтору, охолоджуючись, вступають в хімічну реакцію з кальцієм, калієм і натрієм, присутніми в ТПВ.

Для оцінки взаємодії були виконані дослідження [147, 148], метою яких було визначити кількісний розподіл сірки, хлору і фтору між твердою і

газоподібної фазами на вході в систему газоочистки. Отримані результати дозволяють оцінити концентрацію HCl , HF , SO_3 в продукт-газі, який надходить в систему газоочистки.

У [147, 148] була проведена оцінка розподілу сірки, хлору і фтору по тракту установки, включаючи газоочистку. Система газоочистки включає в себе сухий реактор (абсорбер), в який для уловлювання SO_3 , HCl , HF подається розпилений реагент сорбент реагент-сорбент і рукавний фільтр.

У таблицях 2.2 та 2.3 наведені результати аналізу відібраних в ході випробувань проб для визначення вмісту сірки, хлору і фтору в твердих продуктах згорання [147, 148].

З табл. 2.3 можна зробити висновок, що безпосередньо з установки виводиться 86,1...88,4% сірки; 20,5...24,1% хлору; 25,7...28,5% фтору.

За даними, наведеним в [147, 148] встановлено, що за рахунок вмісту в мінеральну частину ТПВ таких елементів, як кальцій, калій і натрій, в печі піролізу установки зв'язуються практично вся сірка, близько 20... 26% хлору і 27...29% фтору. Таким чином, автори стверджують, що на виході з установки після піролізу ТПВ в газовій фазі міститься не більше 15% сірки у вигляді (SO_3); приблизно 80% хлору у вигляді (HCl) і 75% фтору у вигляді (HF). Слід відзначити, що розрахункові концентрації, що регламентуються для «кислих» газів (SO_3 , HCl , HF) не перевищують відповідно 220; 300 і 15 мг/м^3 при нормальних умовах.

Таблиця 2.2

Масовий вміст сірки, хлору і фтору в відібраних пробах твердих продуктів піролізу.

Компонент	Вид відібраної проби		
	Вуглистий залишок	Виносна зола утилізаційної установки	Виносна зола рукавного фільтра
SO_3 , %	3,3	5,05	4,85
Cl , %	0,3	2,60	10,85
F , мг/кг	8,60	8,70	10,00

Таблиця 2.3

Результати розрахунку виходу сірки, хлору і фтору в різних точках установки піролізу

Компонент	Вид розглянутої компоненти в елементах технології			
	Вуглистый залишок кг/год	Газ на виході з утилізаційної установки, кг/год	Газ на виході з рукавного фільтра кг/год	Газ на виході в систему очищення кг/год
SO ₃ ,	55,1	0,93	7,35	0,02
Cl,	5,17	0,48	18,05	0,22
F,	14,81	0,16	1,55	36,00

Метод сухої сорбції представлено для комплексної переробки ТПВ, схема установки для якої показано на рис. 2.3.

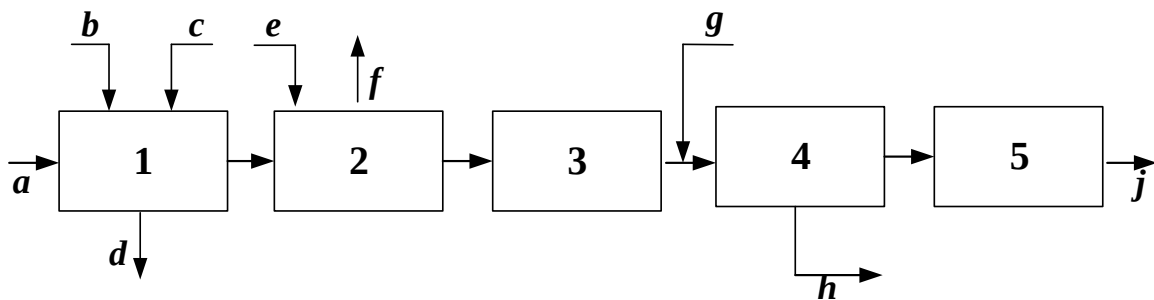


Рис. 2.3. Схема сухої сорбції при термічній утилізації ТПВ технологією піролізу.

(1 - піч піролізу, 2 - підігрівач гарячої води; 3 - звужуючий пристрій, 4 - циклон з тканинним рукавним фільтром; 5 - продуктивний вентилятор продукт-газу, а - повітря, b - сухий порошок CaO або Na₂O, c - ТПВ, d - вугільний залишок, e - холодна вода, f- гаряча вода, g - сухий порошок лужного сорбенту Ca(OH)₂ або Na₂CO₃, j - очищений продукт-газ, h - продукти сорбції та винесення пил з печі піролізу.)

При вихідних концентраціях кислих газів (SO₃, HCl, HF) в синтез-газі (див. табл. 2.3) можливе їх очищення до спалювання методом сорбції шляхом введення реагенту Ca(OH)₂ або Na₂CO₃ (g) безпосередньо в газохід в сухому

розпиленому вигляді з подальшою обробкою і фільтрацією твердих частинок в циклоні з рукавним фільтром (4). З циклону видаляються продукти сорбції та винесений пил з печі піролізу (h). Розкислений продукт-газ (j) - продуктивним вентилятором продукт-газу (5) прямує до споживача.

Основними елементами системи сухої газоочистки є циклон з рукавним тканинним фільтром (4) і попередньо включений камера змішання для подачі в потік продукт-газу (j) сухого порошку лужного сорбенту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або Na_2CO_3 (g).

Основний технологічний процес очистки методом сорбції полягає в розпорошенні лужних реагентів (g) в камеру газоходу та змішанні з потоком продукт-газу в паралельному напрямку. Для інтенсифікації перемішування і рівномірного розсіювання реагентів камера змішання виконана у вигляді пристрою звуження. Введені реагенти вступають в реакцію з кислими газами і адсорбують кислі гази, що знаходяться в газоподібному стані. Далі продукти піролізу ТПВ у вигляді пилу, кислих газів, які частково вступили в реакцію з реагентами, та залишкові реагенти потрапляють в циклон з тканинним рукавним фільтром (4), де тверді частинки осідають на поверхні фільтрувальної тканини. Зі збільшенням шару твердих частинок, підвищується фільтрувальна здатність пиловловлювача. Крім того, реагенти, що містяться в такому шарі, забезпечують додаткове очищення продукт-газу при фільтрації їх через створений шар [149].

2.4. Технологічна схема термічної переробки ТПВ піролізною установкою в адіабатичному потоці.

Реакцію піролізу ТПВ можна уявити як: $\text{ТПВ} + \text{енергія} = \text{C}$ (вуглистий залишок) + смоли + CO + CO_2 + H_2 + H_2O + CH_4 + C_nH_m + HCl + HF + SO_3 . Первинними продуктами можуть бути рідина, тверда вуглиста речовина і гази залежно від виду і параметрів процесу піролізу, вторинними – енергія, паливо та продукти органічної хімії.

Уже йшлося про кислі продукти піролізу в 2.3, так звані «кислі гази». Рідкі продукти піролізу (вони ж «масла», «піропаливо», «синтетичне паливо» або «смоли») у незворотньому вигляді є густою чорною смолянистою рідиною, вихід якої може досягати до 80% маси сухої сировини при швидкому низькотемпературному піролізі. Піропаливо може використовуватися як замінник котельного палива.

Твердим продуктом піролізу є вуглистий залишок, теплоутворююча здатність якого ($Q_{\text{рн}}=30$ МДж/кг), вихід якого може досягати 30...35 % від маси ТПВ. Вуглистий залишок може використовуватися для технологічних потреб металургії, фармакології, для сорбційного очищення води і газів.

Газоподібні продукти, по-перше, продукт-газ, теплоутворююча здатність якого ($Q_{\text{рн}}=15\ldots22$ МДж/н м³), і, по-друге, при частковій газифікації низькокалорійний газ ($Q_{\text{рн}}=4\ldots8$ МДж/н м³). Вихід газоподібного палива може доходити до 70 % від маси ТПВ при високотемпературному швидкому піролізі. Склад газу залежить від сировини і параметрів процесу. Низькокалорійний газ використовується в самому процесі піролізу для підтримки процесу і сушіння вихідної маси ТПВ, наприклад див. табл. 1.7.

Хімічними продуктами піролізу є кілька сотень хімічних складових. Можливість вилучення окремих хімічних сполук відкриває широкі можливості для отримання додаткових компонентів різноманітних технологій.

Сучасні технології піролізу поділяють за такими ознаками (табл. 2.4): швидкість нагріву (швидкий, повільний піроліз), середовище, в якому відбувається піроліз (вакуумний, гідропіроліз, метанопіроліз).

Варто особливо відзначити, що, незважаючи на підвищену увагу до технологій термічної утилізації ТПВ в останні десятиріччя, відсутні математичні моделі і результати їх використання для опису процесів повільного або швидкого піролізу ТПВ навіть у малих діапазонах зміни основних технологічних параметрів. Такий стан теорії процесів, що розглядаються, швидше за все, зумовлений відсутністю експериментальних даних, достатніх для побудови

математичних моделей піролізу і їх подальшого використання для прогностичного моделювання результатів реалізації технологічних циклів термічного розкладання ТПВ [150].

Таблиця 2.4

Характеристики основних технологій піролізу

Характеристики	Швидкий піроліз, низькі температури	Швидкий піроліз, високі температури	Повільний піроліз
Час процесу	1...3 с	2...5 с	до 1800 с
Розмір сировини	малий	малий	середній
Вологість сировини	дуже низька	дуже низька	низька
Температура, °С	550...650	700...1100	600...800
Надлишковий тиск, кПа	120	50...200	150
Газ:			
вихід, % маси сухої сировини	до 30	до 70	до 40
теплота згорання, МДж/н м ³	10–20	10–20	5–10
Рідина:			
вихід, % маси сухого залишку*	до 80	до 20	до 30
теплота згорання, МДж/кг	23	23	23
Тверда речовина:			
вихід, % маси сухого залишку	до 15	до 20	20...30
теплота згорання, МДж/кг	30	30	30

На підставі аналізу технологічних схем проведення піролізу та узагальнення отриманих результатів з класифікації ТПВ і проведеного огляду літературних джерел в розділі 1 щодо закономірностей регульованого термічного розкладання ТПВ можна зробити такі висновки.

1. Для кожної з груп матеріалів (див табл. 2.1.) в залежності від фізико-хімічних властивостей склад продуктів піролізу залежить від умов нагрівання температури і швидкості її зростання. Швидке нагрівання призводить до підвищення частки твердого залишку в продуктах піролізу.

2. Основні експериментальні дані щодо залежності частки твердих, рідких і газоподібних продуктів піролізу від температури і темпу нагріву отримані для харчових відходів.

3. Не виявлено у відкритих джерелах результати узагальнень експериментальних даних, які б дозволили зробити обґрунтований висновок про схожість механізмів термічного розкладання різних видів ТПВ, відповідно, залежностей складу продуктів піролізу від температури та швидкості її зміни.

4. Не встановлено зв'язку виходу продуктів піролізу зі структурою або параметрами ТПВ, що характеризують її склад чи структуру. Відсутні результати теоретичних досліджень процесів як повільного, так і швидкого піролізу ТПВ. Крім того, відсутні модельні основи автоматизованого керування технологічним устаткуванням при проведенні піролізу з багатьма невизначеностями. Крім того, не встановлені оптимальні технологічні параметри реалізації конкретних технологій для видалення кислих газів з продукт-газу.

Результати аналізу термічних технологій утилізації ТПВ в першому розділі (див. 1.3) та аналізі утворення токсичних речовин при тепловій утилізації ТПВ (див. 1.4) дозволили зосередити пошук технологічних схем проведення піролізу ТПВ. У даному розділі були проаналізовані технологічні схеми проведення піролізу (див. 2.2) і розглянуто технологічну схему очищення продукт-газу від (SO_3 , HCl , HF). З опису технологічних схем і експериментальних даних цих схем була розроблена технологічна схема проведення піролізу ТПВ, в основу якої було закладено кращі властивості вивчених технологій. Крім того, були внесені додаткові технологічні прийоми. Була додатково визначена сфера окислення ТПВ як «фільтраційне горіння», в більшості відомих технологій передбачається розгляд реакцій, що тривають як процес окислення сировини повітрям. Ці екзотермічні реакції розглядаються як джерело теплової енергії для підтримки процесу горіння. В [7] розглядається можливість присутності в якості ендотермічних окиснювачів водяної пари і

діоксиду вуглецю. У цьому випадку кисень повітря як окиснювач необхідний як реагент, який підтримує екзотермічну реакцію - джерело теплової енергії. У результаті виділення кращих технологічних прийомів кожної схеми на рис. 2.4 запропоновано технологічну схему установки піролізу ТПВ, яка функціонує в такий спосіб.

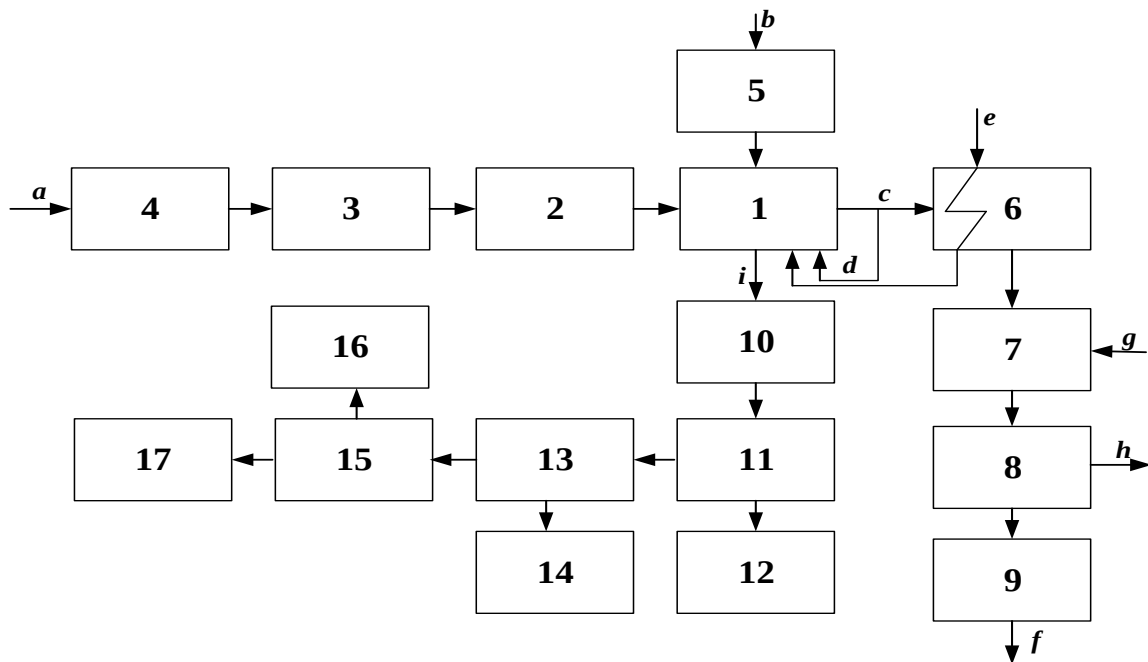


Рис. 2.4. Запропонована технологічна схема установки піролізу ТПВ.

(1 – піч піролізу фільтраційного горіння, 2 – дозуючий бункер, 3 – бункер підготовленого ТПВ, 4 – дробильна установка, 5 – бункер розкиснюючих матеріалів з CaO або Na_2O , 6 – підігрівач повітря для печі піролізу, 7 – звужуючий пристрій, 8 – циклон з тканинним рукавним фільтром, 9 – продуктивний вентилятор продукт-газу, 10 – холодильний барабан охолодження вуглистого залишку, 11 – електромагнітний сепаратор, 12 – бункер чорного металу, 13 – мельниця сепаратор-матеріалів, 14 – бункер селікатних матеріалів, 15 – мокрий сепаратор-мельниця вуглистого залишку і кольорових металів, 16 – бункер кольорового металу, 17 – бункер вуглистого залишку, а – непідготовлені ТПВ, b – сухий порошок CaO або Na_2O , c – отримана первинна суміш продукт-газу, d – первинний продукт-газ, який витрачається на піроліз, e – повітря для технологічного процесу, i – первинний вугільний залишок, g – сухий порошок лужного сорбенту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або Na_2CO_3 , h – продукти сорбції та винесений пил ТПВ з печі піролізу, f – очищений продукт-газ).

Непідготовлені ТПВ (а) надходять на дробильну установку (4), далі в приймальний бункер підготовленого ТПВ (3) запропонованої установки піролізу. З приймального дозуючого бункера ТПВ подають в проміжний бункер (2), днищем якого служить пластинчастий живильник, призначений для завантаження ТПВ в піч піролізу фільтраційного горіння (1). Крім того, в піч піролізу з бункера розчинюючих матеріалів (5) в піч подається лужні сполуки CaO або Na_2O . Ще з підігрівача повітря в піч піролізу (6) подається регенеративне підігріте повітря (е). Піроліз проводиться при температурі $550\ldots 650^\circ\text{C}$ без доступу повітря або з його обмеженням. У результаті утворюється газова суміш (с), яка містить в своєму складі продукт-газ, що утворився, кислі гази, пари смол і твердий вуглецевмісний продукт - вуглецевий залишок (і). Керування процесом піролізу відбувається, на відміну від попередньо розглянутих схем, регулюванням подачі первинного продукт-газу (d).

Отриманий в печі вуглистий залишок (і) з температурою $450\ldots 500^\circ\text{C}$ у відсутності окиснювача надходить в холодильний барабан (10), де охолоджується до $40\ldots 50^\circ\text{C}$, і далі по стрічковому конвеєру подається на помел, попередньо пройшовши електромагнітний сепаратор (11) для вилучення залишків чорного металу, які направляються в бункер (12), і потім надходить на мельницю-сепаратор (13) для відділення силікатних фрагментів ТПВ, які направляються в бункер (14), і далі зазнає мокрого помелу (15). Подрібнені частинки, розміром до 5 мм і менше, надходять на відцентрову сепарацію для вилучення фрагментів кольорових металів, які направляються в бункер (16), а вуглистий залишок направляють в бункер (17). Одночасно з цим отримана в печі (1) первинна суміш продукт-газу (с) направляється в підігрівач повітря для печі піролізу (6), де продукт-газ передає тепло повітрю.

При вихідних концентраціях кислих газів (SO_3 , HCl , HF) в продукт-газі проходить його очищення методом сорбції шляхом керованого введення сухого порошку $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або Na_2CO_3 (g) безпосередньо в газогін в звужуючий

пристрій (7) з подальшою обробкою і фільтрацією твердих частинок (h) в циклоні з рукавним фільтром (8). З циклону видаляються продукти сорбції та винесений пил з печі піролізу (h). Розкислений продукт-газ (j) - продуктивним вентилятором продукт-газу (9) прямує до споживача.

Така складна технологічна схема дозволить утилізувати ТПВ з наступними узагальненими приведеннями їх формулами без змін функціональних налаштувань системи автоматичного регулювання CH_m , CH_nO_d , CH_kCl_f , CH_qF_j , $CH_wO_xN_y$, CH_zS_p . Але слід зазначити, що підтримка потрібної кількості повітря в печі піролізу є погано зумовленою задачею. Тому в наступному розділі необхідно розв'язати таку задачу.

2.5. Висновки до другого розділу

1. Імітаційного моделювання різних груп ТПВ умовною формулою дозволило їх класифікувати за чотирма групами. Класифікаційною ознакою стала кількість атомів в органічній сполуці, яка притаманна тим чи іншим видам ТПВ. До першої групи потрапили ТПВ, які умовно можна віднести до такої умовної формули CH_m , — вуглеводневі. Основу таких ТПВ складає насамперед поліетиленова плівка, поліпропіленові та полістерені елементи штучних конструкцій. До другої групи потрапили ТПВ, які умовно можна віднести до такої умовної формули CH_nO_m , — вуглеводневі ті, що містять кисень. Основу таких ТПВ складає насамперед папір, картон, деревина, ПЕТФ, тара, штучний текстиль (триацетат целюлози та віскоза). До третьої групи було віднесено ТПВ, які умовно можна віднести до такої умовної формули $CH_nO_mN_k$, — вуглеводневі ті, що містять кисень, азот. Основу таких ТПВ складають насамперед харчові відходи, залишки органіки, нейлон, вовна, шкіра. До четвертої групи було віднесено ТПВ, які умовно можна віднести до таких умовних формул CH_nF_m , CH_nCl_m , CH_nS_m — вуглеводневі ті, що містять активні елементи. Основу таких ТПВ складають насамперед поліхлорвінільні та вініліденфторидні елементи конструкцій, гума, в тому числі автомобільна.

2. У розділі розглянуті технологічні схеми піролізу непідготовлених та попередньо підготовлених ТПВ. Кожна схема має свої недоліки та переваги. До недоліків було віднесено незрозумілий технологічний прийом очищення продукт-газу від кислих газів. Крім того, для регулювання кількості підведеного тепла використовується вуглистий залишок, якій по суті спалюється в зоні хімічної реакції. Використання вуглистого залишку збільшує кількість CO_2 в суміші продукт-газу.

3. Показана оцінка розподілу сполук сірки, хлору і фтору по тракту піролізної установки. Приведено схему систему газоочистки, яка включає в себе абсорбер, в який для уловлювання кислих газів SO_3 , HCl , HF подається розпилений реагент сорбент у вигляді сухого лужного порошку сорбенту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або Na_2CO_3 , і рукавний фільтр. Для очищення газоподібних продуктів згорання ТПВ від «кислих» газів пропонується застосувати систему газоочистки, в основі якої лежить сухий лужний метод.

4. Показано, що вуглистий залишок має теплоутворювальну здатність $Q_{\text{рн}}=30$ МДж/кг, вихід якого може досягати 30...35 % від маси ТПВ. Продукт-газ має теплоутворювальну здатність $Q_{\text{рн}}=15\ldots22$ МДж/н м^3 і при частковій газифікації низькокалорійний газ $Q_{\text{рн}}=4\ldots8$ МДж/н м^3 . Запропонована технологічна схема, де піч піролізу працює за технологією фільтраційного горіння, підігрів повітря для окиснювання здійснюється за рахунок охолодження продукт-газу, а в піч додатково для розкислення додається сухий порошок CaO або Na_2O .

РОЗДІЛ 3. МЕТОД БІБЛІОТЕКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ПРОДУКТІВ ПІРОЛІЗУ ТПВ

3.1. Загальні положення.

На сьогодні немає єдиного методу управління процесом термічної утилізації ТПВ невідомого складу. Це зумовлено різними призначеннями технологічного продукту, який одержується в подальшому: спалювання для енергетичних потреб, застосування в якості нафтохімічної сировини або використання отриманого продукту в металургійній технології.

Використання будь-яких видів екстремальних регуляторів має загальний недолік, який залежить від виду екстремальної характеристики. При наближенні до точки екстремуму градієнт вимірюваного параметра з прийнятою обчислювальною похибкою зменшується до нуля. Таке відбувається як для випадку визначення максимальної температури при горінні [111], так і для випадку визначення максимальної температури теплоносія [112]. Аналогічна властивість градієнта вимірюваного параметра виникає і у випадку визначення мінімальної концентрації окису вуглецю (CO), коли значення концентрації кисню в димових газах наближається до нуля [113]. З урахуванням наявності порога чутливості і похибок систем вимірювання та регулювання в точці екстремуму виникають великі похибки визначення величини, пошук якої здійснюється. Шуми вимірювальних каналів так само вносять негативний вплив на точність визначення такої величини. Як наслідок, в околі точки екстремуму утворюється максимальна похибка вимірювання, що істотно ускладнює, а в низці випадків робить неможливим використання екстремальних регуляторів.

Можна використовувати газові аналізатори для ідентифікації компонентів в невідомих газових сумішах. В подальшому ідентифіковані суміші використовують при спалюванні з енергетичною метою або ідентифіковані компоненти використовують для перетворення в хімічних технологіях вуглеводневих газів. У таких випадках з'являється можливість організації

процесів управління, які не мають екстремальних характеристик. Прикладом може бути піч безоxygenного нагріву [114] або реактори органічного синтезу.

З метою встановлення якісного і кількісного складу газу розрізняють хімічні, фізико-хімічні та фізичні методи. Відомі переваги фізико-хімічних і фізичних методів перед хімічними, а саме, швидкість виконання, можливість автоматизації аналізу, зробили можливим їх більш широке поширення. Наразі найбільш широке застосування знаходять методи газової хроматографії [115]. Основними недоліками цих пристроїв є послідовний вимір компонентів газу, тривалий час аналізу.

З появою невеликих, надійних лазерних джерел і високочутливих багатоканальних фотоприймачів з'явилися газоаналізатори, засновані на використанні спонтанної рамановської спектроскопії (spontaneous Raman spectroscopy) [116], хоча до теперішнього часу такі газоаналізатори знаходяться на стадії дослідно-промислових розробок. Крім того, такі пристрої вимагають висококваліфікованого обслуговування.

Велика частина розрахунків параметрів процесів горіння виконується на основі методів хімічної кінетики через визначення наведеної формули суміші як окремої речовини [117]. При використанні такого підходу для розгляду процесу горіння суміші газів розраховується ентальпія і визначається брутто-формула. Така задача є зворотною і некоректно поставленою.

Не існує єдиного методу вирішення всього різноманіття зворотніх і некоректно поставлених задач. Кожен їх вид вимагає індивідуального підходу. Це ускладнює або навіть виключає, використання існуючих методів визначення в автоматичному регуляторі брутто-формули ТПВ змінного складу. Крім того, склад ТПВ може багаторазово випадково змінюватися протягом будь-якого проміжку часу. Це спричиняє необхідність оперативного багаторазового отримання рішення задачі, що призводить до необхідності розробки нового методу розв'язання оберненої і некоректно поставленої задачі.

У даному розділі показано рішення задачі визначення складу спалюваного газу методом бібліотеки як завдання інтерпретації моделі визначення складу пального. Етапи вирішення такої задачі мали таку послідовність.

1. Пошук методу розв'язання оберненої і некоректно поставленої задачі.
2. Розробка способу заповнення бібліотеки рішень прямої задачі в межах обраного методу розв'язання складної задачі інтерпретації як різновиду зворотної і некоректно поставленої задачі.
3. Розробка методу пошуку рішення складного завдання інтерпретації на базі використання рішень прямої задачі.
4. Визначення величини похибки, що вноситься в рішення при використанні розробленого методу.
5. Визначення впливу похибки вимірювань технологічних параметрів на точність визначення складу пального.

3.2. Методи обчислення умовної формули ТПВ

3.2.1 Аналіз можливості вирішення завдання визначення умовної формули ТПВ

Існуючі моделі і методи з визначення складу ТПВ по вимірних витратах його і повітря, а також по температурі продуктів згорання, викладені в [6, 10, 151], дозволяють за надлишковим вимірюванням витрат палива, повітря і температури полум'я, здійснювати корекцію узагальненої формули газоподібного палива для компенсації внутрішніх і зовнішніх збурень. Таке коригування при регулюванні дозволяє знайти стійке рішення для співвідношення паливо - повітря. Запропонований метод визначення змінного складу палива дозволяє в режимі реального часу забезпечити ефективну експлуатацію обладнання. Розроблена модель і метод розв'язання визначення умовної формули пального являє собою систему нелінійних алгебраїчних рівнянь. Застосування методу Ньютона-Рафсона для визначення температури продуктів згорання при відомому складі палива дало рішення, що збігається [6,

10, 151].

Була здійснена спроба застосування такого підходу для визначення складу ТПВ за вимірними витратами і температурою на основі запропонованої моделі, але не був отриманий позитивний результат. Не вдалося подібним чином отримати рішення для більш простого випадку з ТПВ першої групи (див. табл. 2.1.). В останньому випадку в якості ТПВ для моделювання розглядався поліетилен. Вуглеводневе пальне вибрано через збіг складу продуктів згорання [6, 10, 151] в порівнянні з випадком спалювання кисневмісного пального. Відмінність стосується лише кількості визначених величин і, отже, кількості рівнянь. Так, склад вуглеводневого палива визначається тільки двома величинами b_C і b_H в умовній формулі пального $C_{b_C}H_{b_H}$, а кисневмісного вуглеводневого палива - трьома: b_C , b_H , b_O в умовній формулі $C_{b_C}H_{b_H}O_{b_O}$. Проведемо аналіз можливих причин нестійкості рішення.

Метод розв'язання, застосований в [6, 10, 151] найчастіше використовується в інженерних розрахунках — метод Ньютона-Рафсона. В процесі пошуку причин виникнення нестійкості в процесі рішення було проаналізовано систему лінійних рівнянь, що утворюється при лінеаризації вихідної нелінійної системи. Обчислення детермінанта її основної матриці у всіх розглянутих випадках дало кінцеву величину. Це показує, що система не вироджується, тобто має рішення, а модель коректна.

Для визначення причини нестійкості числового пошуку під час розв'язання вихідної нелінійної системи рівнянь розглянемо зумовленість матриці лінеризованої системи, що характеризує чутливість її рішення до малих змін коефіцієнтів. В [152] було зроблено висновок, що близьке до нуля значення детермінанта матриці A ($\det(A)$) свідчить про її погану зумовленість. Значення числа зумовленості матриці A ($\text{cond}(A)$) є набагато більш істотною оцінкою отримання розв'язку лінійної системи $Ax = b$, ніж близьке до нуля значення $\det(A)$, або великий порядок n .

Число зумовленості квадратної матриці:

$$\text{cond}(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\|. \quad (3.1)$$

Тут $\|A\|$ и $\|A^{-1}\|$ - норми відповідно вихідної лінеаризованої основної матриці системи рівнянь та оберненої. Число зумовленості матриці залежить від вибору норми. Але, якщо матриця добре зумовлена, то її число зумовленості буде малим при будь-якому виборі, а якщо вона погано зумовлена, то її число зумовленості буде велике при будь-якому виборі норми. На практиці найбільш широко використовують 1-норму, 2-норму і ∞ -норму. Для обчислень була обрана ∞ -норма, яка визначається у вигляді максимальної суми модулів елементів кожного з рядків матриці:

$$\|A\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |a_{ij}|. \quad (3.2)$$

У розрахунковому варіанті число зумовленості визначається так:

$$\text{cond}(A) = \|A\|_{\infty} \cdot \|A^{-1}\|_{\infty}. \quad (3.3)$$

По суті, зумовленість оцінює близькість матриці коефіцієнтів A до виродження. Число зумовленості $\text{cond}(A)$ є кількісною оцінкою зумовленості. Відзначимо, що завжди $\text{cond}(A) \geq 1$. Якщо $\text{cond}(A) \geq 10^3$, то матриця A погано зумовлена. Якщо $1 \leq \text{cond}(A) \leq 100$, то матриця вважається добре зумовленою.

Було розглянуто два типи вуглеводневого палива метан (CH_4) і кисневмісних палива етиловий спирт (C_2H_5OH). Для кожного типу палива було розглянуто розв'язання прямої і зворотної задачі.

Для варіантів розв'язання прямої задачі отримано стійке рішення вихідних систем нелінійних рівнянь. У той час, як для варіантів зворотної задачі стійкого

рішення отримати не вдалося. Значення зумовленості матриць для кожного з варіантів наведено в таблиці 3.1.

Для розглянутих варіантів при розв'язанні прямої задачі значення $cond(A)$ отримані різні, але закономірності однакові. Число зумовленості систем збільшується при наближенні до розв'язку. Причиною цього є те, що при наближенні до розв'язку зменшується різниця між попереднім наближенням і розрахованим поточним значенням. При цьому зростає вплив похибки розрахунку коефіцієнтів матриці системи рівнянь, яку було лінеаризовано. Значна величина $cond(A)$ вимагала застосування на кожній ітерації коефіцієнта нижньої релаксації (0.5) для забезпечення збіжності процесу обчислення, що дозволило отримати адекватні рішення [6, 10, 151].

Інша ситуація для варіантів розв'язання зворотної задачі. Попередньо розраховані значення $cond(A)$ для початкового наближення виявилися дуже великими (див. табл. 3.1.).

Великі величини чисел зумовленості пояснюють відсутність збіжності рішення для зворотної задачі. Як показали розрахунки для варіантів прямого розв'язання задачі, слід враховувати збільшення величин $cond(A)$ при ітераційному наближенні до стійкого рішення.

На підставі вищевикладеного визначення зумовленості системи рівнянь, що лінеаризовано, було проведено порівняння двох варіантів вихідних даних, результати розрахунків яких представлені в табл. 3.1.

Погана зумовленість систем рівнянь, що було лінеаризовано, які використовуються в ітераційному процесі розв'язання вихідних систем нелінійних рівнянь, відображає високу чутливість наближень. Проблема може бути вирішена шляхом підвищення точності початкових наближень. Причому, чим більше значення числа зумовленості матриці, тим точніше має бути початкове наближення визначених величин, в якості яких виступають парціальні тиски продуктів згорання і кількість атомів хімічних елементів в умовній формулі пального.

Таблиця 3.1

Результати розрахунків чисел зумовленості матриці $cond(A)$ для двох видів вуглеводневого палива

Тип розв'язуваної задачі за визначенням	Числа зумовленості матриці $cond(A)$ для двох видів вуглеводневого палива			
	CH_4		C_2H_5OH	
	початкове наближення	розв'язок	початкове наближення	розв'язок
Температури продуктів згорання газів при відомому складі пального за вимірними параметрами - співвідношенню витрат (пряма).	540	1390	73	230
Складу пального за вимірними параметрами - співвідношенню витрат пального і повітря, і температурі продуктів згорання (зворотня).	5200	—	110000	—

Але вихідні дані для розв'язання такої задачі не дозволяють зробити це. Кількість атомів в процесі розв'язання може змінюватися, що є непередбачуваним. Наведені вище розрахунки стосуються видів горючих, що складаються не більше ніж з трьох хімічних елементів $C_{b_C}H_{b_H}O_{b_O}$.

3.2.2 Визначення методу розв'язання задачі контрольованого спалювання газоподібного палива змінного складу.

Одним із прийомів для вирішення проблеми поганої зумовленості лінеризованої системи рівнянь використовується метод розв'язання за параметром. Цей метод можна застосовувати в тих випадках, якщо в розглянутому рівнянні або системі рівнянь можна виділити який-небудь

параметр θ , від якого вони залежать. У цьому випадку можна записати

$$f(x, \theta) = 0, \quad (3.4)$$

а розв'язок слід шукати при деякому фіксованому (кінцевому) значенні параметра θ_c . Припустимо, що при будь-якому значенні параметра в діапазоні від деякого початкового значення θ_n до θ_c ($\theta \in [\theta_n, \theta_c]$) система (3.4) має розв'язок $\bar{x} = \bar{x}(\theta)$. При цьому для $\theta = \theta_n$ розв'язок системи $f(x, \theta) = 0$ відомий або легко розраховується. Введемо на відрізку $[\theta_n, \theta_c]$ набір точок $\theta_n = \theta_0 < \theta_1 < \theta_2 \dots < \theta_N = \theta_c$. Будь-яким ітераційним методом розв'язується система послідовно для $k = 0, 1, 2, \dots, N$. При цьому за початкове наближення $\bar{x}(\theta_k)$ прийматимемо рішення $\bar{x}(\theta_{k-1})$. Різниця $\theta_k - \theta_{k-1}$ вибирається малою величиною так, щоб розв'язок $\bar{x}(\theta_{k-1})$ був досить хорошим початковим наближенням до $\bar{x}(\theta_k)$, що забезпечує збіжність ітераційного методу, що використовується, при будь-якому ступені зумовленості системи рівнянь.

Основною перевагою описаного методу [153] є глобальна збіжність при виборі малого кроку зміни параметра.

У моделі визначення складу ТПВ за вимірними параметрами, а саме за співвідношенням витрат ТПВ і повітря та температурі продуктів згорання, був виділений параметр у вигляді змінюваного і виміряного відношення об'ємних витрат окиснювача і пального у вигляді ТПВ ($\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$) [6, 10, 151]. Але була виявлена проблема, яка полягає в тому, що такий параметр не є однозначним. Виявилося, що кількість таких параметрів дорівнює кількості хімічних елементів, що становлять умовну формулу невідомого пального. Відповідно до цього їх може бути, наприклад, до шести ($[C]$, $[H]$, $[O]$, $[N]$, $[Cl]$, $[S]$). Це не виключає принципову можливість вирішення завдання за допомогою методу продовження рішення за параметром, але істотно ускладнює розв'язання задачі через одночасні варіювання такою кількістю змінних.

Було виявлено існування причини, яка принципово не дозволяє

використовувати цей метод. Крім розрахунків величин парціальних тисків продуктів згорання P_j^i ; кількості молей палива M_T^j , що беруть участь в розрахунках і дорівнюють кількості вимірів; кількості атомів b^j хімічних елементів, в моделі присутні величини температур продуктів згорання T^i . Вони не варіюються як параметри, але і не обчислюються як вихідні змінні. У межах моделі визначення складу ТПВ за вимірними параметрами ці величини не передбачувані [6, 10, 151]. Вони вимірюються в результаті організованого процесу спалювання ТПВ.

Варіювання параметра і стійкий (який має збіжність) процес розрахунку складають основу ідеї методу визначення температури продуктів згорання при відомому складі ТПВ, так звана пряма задача.

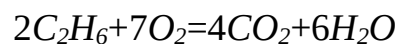
Задача визначення складу ТПВ за вимірними параметрами, а саме за співвідношенням витрат ТПВ і повітря та за температурою продуктів згорання — це складна задача інтерпретації, так звана зворотня задача. Однією з її ознак є не одночасний, а незалежний один від одного вимір параметрів з деякого їх числа. Для вирішення такої задачі використовують метод «бібліотеки» як найбільш загальний. У його межах для «заповнення» багаторазово розв'язується пряма задача при різних поєднаннях вихідних даних. В якості розв'язку зворотної задачі з бібліотеки рішень прямої задачі вибирається такий елемент, який з прийнятою похибкою відповідає зробленим вимірам. Такий процес розв'язання передбачає подолання деяких математичних труднощів. Як і для будь-яких некоректних задач, необхідним елементом є введення додаткової апріорної інформації про шуканий об'єкт і правил розв'язання. Некласичне розв'язання пов'язане зі зміною уявлення про саму модель. У цьому випадку для отримання «розв'язку» модель включає апріорну інформацію про можливий характер передбачуваного рішення, що зменшує інформаційну невизначеність, та алгоритм обробки інформації. Виходячи з цих передумов, в подальшому потрібно розробити метод розв'язання задачі визначення складу ТПВ по вимірним незалежним величинам.

3.3. Спосіб заповнення бібліотеки при розв'язанні прямої задачі

Бібліотека заповнюється розв'язками прямої задачі за 6 величинами. Це кількість атомів відповідних елементів в брутто-формулі ТПВ (b_C, b_H, b_O, b_N), коефіцієнт надлишку повітря α і величина ентальпії ТПВ I_t .

Розмір інтервалу кожної з шести величин може бути будь-яким. Для визначеності приймемо 100, що дозволить відстежити зміну кожної з величин b_C, b_H, b_O, b_N , наприклад, в інтервалі 0,05 ... 4,95 з кроком 0,05, величини α — в інтервалі 0,025 ... 2,5 з кроком 0,025. Це вимагає $(100)^6 = 10^{12}$ рішень прямої задачі з фіксацією всіх результатів, але можливо скорочення мірності задачі.

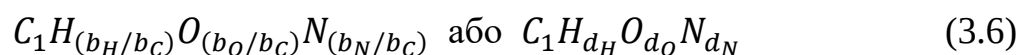
Якщо азот (N) до складу палива вноситься тільки з повітря, то величина b_N зі списку варійованих виключається і кількісно буде розраховуватись через коефіцієнт надлишку окиснювача α . Далі, відповідно до [154] кількість змінних в задачі може бути зменшено за рахунок їх нормування. Для впровадження раціонального або більш широко контрольованого процесу спалювання палива немає необхідності знати його брутто-формулу. Досить визначити співвідношення кількості атомів хімічних елементів, що входять до нього. Наприклад, процес горіння етану, який проходить стехіометрично, може бути створений як на основі його повної формули, так і при нормованій кількості атомів:



або



Нормування виконано за кількістю атомів вуглецю. В брутто-формулі кількість атомів не обов'язково має бути цілим числом. У розглянутій задачі кількість атомів вуглецю буде постійним і рівним 1. У такому випадку брутто-формула визначається у вигляді:



У результаті кількість рішень прямої задачі знижується до $(100)^4=10^8$ варіантів. Розглянемо метод перетворення отриманих результатів у форму, зручну для пошуку розв'язку на основі технологічних вимірювань температури продуктів згорання і об'ємних витрат ТПВ і окиснювача.

1. Основний обсяг результатів розрахунку при вирішенні прямої задачі складають парціальні тиски газів в суміші продуктів згорання. Для визначення складу вихідного ТПВ вони участі не беруть і в бібліотеці відсутні.

2. Шляхом варіювання d_H, d_O, d_N і з (3.6) для кожного варіанта розв'язання прямої задачі задається певний склад ТПВ і обчислюється молярний стехіометричний коефіцієнт співвідношення компонентів χ_0 . З урахуванням [6, 10, 151] $\chi = \alpha \cdot \chi_0$ і $\chi = \dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ зміна величини коефіцієнта надлишку окиснювача α перераховується в зміну відношення вимірюваних технологічних параметрів $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$.

3. Для всіх можливих поєднань вихідних даних $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ (α), d_H, d_O, d_N і I_t , що виникають при варіюванні цих величин, розв'язується пряма задача визначення температури продуктів згорання. У низці випадків співвідношення складу ТПВ і його ентальпія, що розглядається, є несумісними з фізичної точки зору. Такі варіанти розв'язку виключаються з розгляду.

4. Для всіх існуючих розв'язань прямої задачі сукупність вихідних даних d_H, d_O, d_N і I_t записуються в нормованому вигляді. Наприклад,

$$\bar{d}_H = \frac{d_H - d_H^l}{d_H^r - d_H^l} \cdot 100. \quad (3.7)$$

Тут d_H - кількість атомів водню в даній реалізації прямої задачі; d_H^l , d_H^r - ліва і права границі розглянутого інтервалу зміни величини кількості атомів водню при вирішенні прямої задачі. У даному випадку множник «100» відповідає кількості кроків зміни d_H . Його величина зумовлена лише обраним діапазоном (0...4,95) і кроком (0,05) зміни. У результаті $\bar{d}_H \in [00 \dots 99]$. Аналогічним чином

перетворюються d_O, d_N і I_t з отриманням відповідних величин $\bar{d}_O, \bar{d}_N$ і $\bar{I}_t$, значення яких також змінюються в такому ж або подібному інтервалі.

Отримані значення об'єднуються в одне число « E_k » на основі позиційного принципу представлення десяткових чисел шляхом установки знайдених величин на відповідні його розряди (рис. 3.1.). Було прийнято: для визначеності в перші два розряди розмістити значення. Хоча порядок формування цього числа може бути будь-яким іншим. У результаті утворюються комплекси, в яких кожній парі значень результатів розв'язання прямої задачі (T і $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$) відповідає одне число, в якому згорнуто значення відповідних їм вихідних даних;

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

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

Рис. 3.1. Вигляд та схема позиційного представлення єдиного числа нормованих значень вихідних даних

5. Результати розрахунку (T і $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$) зазнають структуризації наступним чином. Визначаються $\max [T^r, (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)^r]$ і $\min [T^l, (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)^l]$ значення. Діапазони їх зміни розбиваються на кілька інтервалів. Кількість інтервалів і, відповідно, величина кроку зміни кожної величини визначається доступною технологічною точністю вимірювання величин (T і $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$) в процесі спалювання палива.

6. Використовуючи результати рішення (T і $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$) прямої задачі і відповідні їм вихідні дані, зведені в єдине число « E_k », формується тривимірний масив (рис. 3.2). Площина $T - \dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ розбивається на комірки зі сторонами:

$$\Delta T = \frac{T^r - T^l}{N}; \Delta V = \frac{(\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)^r - (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f(\alpha))^l}{M}. \quad (3.8)$$

Тут N, M - кількість елементів (інтервалів) за відповідними осями. Границі комірок визначаються зі співвідношень:

$$T_i^l = T^l + \Delta T \cdot (i - 1); T_i^r = T^r + \Delta T \cdot i; i \in [0, N]. \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)_j^l &= (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)^l + \Delta V \cdot (j - 1); \\ (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)_j^r &= (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)^r + \Delta V \cdot j; j \in [0, M], \end{aligned} \quad (3.10)$$

де i, j - номери комірок по осях T і $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ відповідно

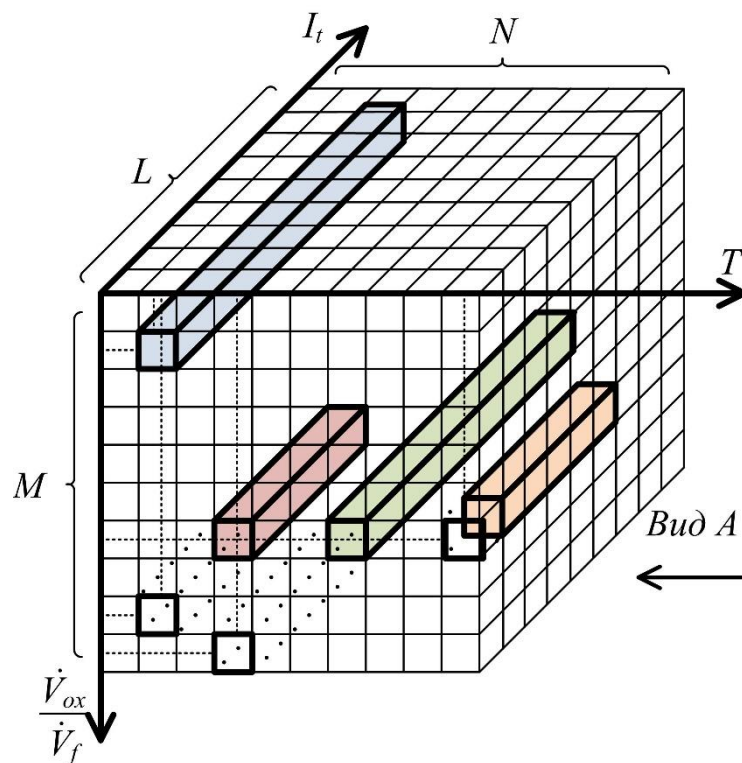


Рис. 3.2. Схема формування, структурованого робочого тривимірного масиву «бібліотеки» на основі вихідних даних і результатів розв'язання прямої задачі

7. Кожній комірці ставиться у відповідність вектор розмірності L (рис. 3.2), елементами якого є числа « E_k ». Величина числа визначається значенням в першому (старшому) розряді. У даному випадку значення в перших розрядах визначаються величиною ентальпії. Тому вісь векторів позначена як вісь

ентальпій I_t . Крок зміни величини елементів з вектору визначається таким же способом (3.8), як і для T або $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$:

$$\Delta I_t = \frac{I_t^r - I_t^l}{L}, \quad (3.11)$$

а діапазон зміни ентальпій, відповідний кожному з елементів вектору, визначається зі співвідношень, аналогічних (3.9) або (3.10):

$$(I_t^l)_k = I_t^l + \Delta I_t \cdot (k - 1); (I_t^r)_k = I_t^r + \Delta I_t \cdot k; k \in [0, L]. \quad (3.12)$$

Тут, I_t^l , I_t^r - мінімальне і максимальне значення ентальпій з розглянутого діапазону їх зміни при вирішенні прямої задачі; ΔI_t - крок зміни ентальпії; L - кількість елементів, на яке розбивається розглянутий інтервал зміни ентальпії. Величини L , M і N , визначаються з урахуванням необхідної точності розгляду відповідних величин. Візьмемо, для прикладу, що в шести розглянутих величинах $N=100$ і $M=100$. У цьому випадку на площині $T - \dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ формується 10^4 комірок. При кількості реалізацій рішення прямої задачі кожній з 10^8 комірок можуть відповідати результати $\sim 10^8/10^4=10^4$ розв'язків. Аналогічна кількість пов'язаних з цими рішеннями чисел « E_k » розміщуються в елементах відповідних векторів.

8. В елементах вектору розміщуються значення « E_k », які знаходяться в відповідних їм границях:

$$E_k \in [(I_t^l)_k, (I_t^r)_k]. \quad (3.13)$$

Деякі елементи векторів виявляються незаповненими, тому що не всі комбінації складу палива $(\bar{d}_H, \bar{d}_O, \bar{d}_N)$ можуть бути реалізовані при розглянутому переліку величин ентальпій I_t . Елементи векторів впорядковані в

порядку зростання. Тому значення чисел « E_k » в рамках кожного вектору також впорядковані в порядку зростання. Приклади заповнення деяких векторів наведені на рис. 3.2 і відзначені кольором.

Таким чином, на основі розв'язання прямих задач і обробки результатів розрахунків сформований робочий тривимірний масив «бібліотека». Величини з масиву можуть бути використані при визначенні складу різних ТПВ. Важливо, щоб їх брутто-формула складалася з хімічних елементів, використаних при формуванні робочого масиву. При цьому деякі елементи можуть бути відсутніми. Наприклад, розглянутий масив може служити основою для визначення складу як кисневмісних, так і безкисневих вуглеводнів при горінні їх в повітрі (з урахуванням азоту) і в кисні.

3.4. Метод пошуку розв'язання зворотної задачі інтерпретації на базі використання даних бібліотеки

Метод визначення складу ТПВ з використанням сформованого робочого тривимірного масиву «бібліотеки» здійснюється наступним чином:

1. Змінюючи і фіксуючи величину відношення об'ємних витрат окиснювача і пального ($\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$), вимірюється температура продуктів згорання T_i для кожного випадку. Кількість таких змін і вимірювань визначається кількістю нормованих величин. Так в разі палива виду (3.6) необхідно отримати вимірювальні відгуки в якості чотирьох величин ($\bar{d}_H, \bar{d}_O, \bar{d}_N, I_t$) і, відповідно, виконати чотири послідовні серії вимірювань.

2. Відповідно до цих вимірів на площині $T - \dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ робочого тривимірного масиву визначаються чотири комірки (виділені штриховими лініями) (рис. 3.2) і пов'язані з ними вектори (виділено кольором). Дані з інших векторів на даному етапі методу, що розглядається, не використовуються. Елементами векторів є числа E_k . У кожному векторі в E_k записані всі можливі комбінації визначених

величин $(\bar{d}_H, \bar{d}_O, \bar{d}_N, I_t)$, які забезпечують температуру T_i при різних значеннях $(\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)_i$ у відповідних комірках.

3. Вибрані вектори (вид А, рис. 3.2) проєктуються на площину $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f - I_t$. Можливе положення векторів відображено на рис. 3.3 і виділено кольором.

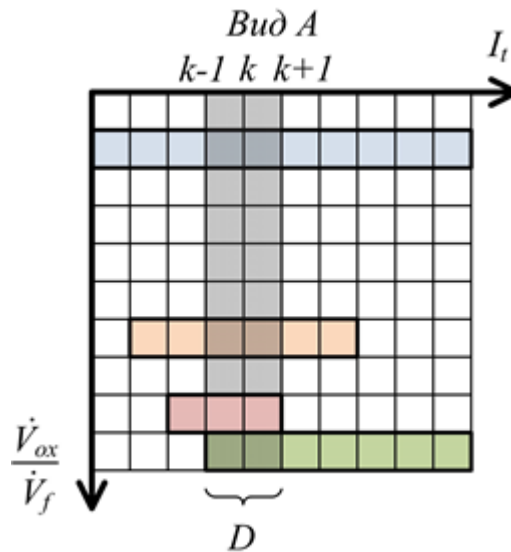


Рис. 3.3. Приклад проєкції обраних векторів

4. При всіх різноманітних комбінаціях об'ємні витрати складу і ентальпія ТПВ, що визначається, залишаються постійними. Отже, повинні бути однаковими і відповідні їм величини чисел E_k у всіх розглянутих векторах. На цій підставі виділяються відповідні елементи чисел E_k , що відображено областю D на рис. 3.3. В реальній ситуації ця область може займати більш, ніж два інтервали. Всі інші елементи вибраних векторів не розглядаються в подальших перетвореннях. У старших розрядах чисел E_k відображаються значення ентальпії ТПВ. Отже, в кожному інтервалі $(k-1 \leftrightarrow k$ і $k \leftrightarrow k+1)$ в елементах векторів розташовуються комплекти вихідних даних (числа E_k) з однаковими значеннями ентальпії. Точніше, ентальпії знаходяться в інтервалах $(I_t)_{k-1} \leftrightarrow (I_t)_k$ і $(I_t)_k \leftrightarrow (I_t)_{k+1}$, зумовлених точністю їх визначення.

5. Всі виділені числа (область D , рис. 3.3) групуються в стек. Значення з старших розрядів (рис. 3.1) переносяться в кінець числа. У старші розряди переносяться значення наступної величини, що визначається (рис. 3.4).

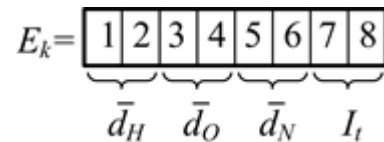


Рис. 3.4. Схема позиційного представлення у вигляді єдиного числа нормованих значень вихідних даних після його перетворення

У рамках розглянутих векторів числа, що залишилися, сортуються, наприклад, в зростаючому порядку. В результаті утворюється масив чисел, що залишилися.

6. Дії з пункту 4 повторюються до тих пір, поки не будуть використані всі величини зі списку визначених ($I_t, \bar{d}_H, \bar{d}_O, \bar{d}_N$). Таким чином на кожному кроці виділяються числа з двома однаковими старшими розрядами, які відповідають в даний момент одній з визначених величин. Так, при другому проході це $\bar{d}_H$, при третьому - $\bar{d}_O$ і так далі. При кожному проході кількість чисел E_k , що залишилися, зменшується. У кінцевому підсумку залишається одне. У ньому зосереджені вихідні дані, які відповідають усім заміряним T_i при заданих $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$. Це число і є результатом розв'язання зворотної задачі.

3.5. Розв'язання зворотної задачі визначення складу палива

3.5.1. Моделювання технологічних вимірів без похибок

Запропонований метод пошуку розв'язання зворотної задачі інтерпретації на базі використання даних бібліотеки був перевірений на адекватність за даними заздалегідь відомого складу газів: метану (CH_4), пропану (C_3H_8) і

етилового спирту (C_2H_5OH). Для метану раціональна брутто-формула і наведена брутто-формула співпадають. Для пропану співпадають раціональна і брутто-формули. Наведена брутто-формула має вигляд $CH_{8/3}$ або $CH_{2,(6)}$. Для спирту брутто-формула і наведена брутто-формула мають вигляд C_2H_6O і $CH_3O_{0,5}$ відповідно. Розглядався приклад спалювання цих речовин у кисні. Це дозволяє використовувати для пошуку складу палива брутто-формулу виду:

$$CH_{\bar{d}_H} O_{\bar{d}_O} . \quad (3.14)$$

Такий вибір для перевірки адекватності методу викликаний наступними причинами:

- використання повітря як окиснювача не вносить у процес горіння принципових особливостей у порівнянні з використанням кисню. При цьому відсутність азоту робить перевірку працездатності методу менш об'ємною;
- вибір спирту в якості пального зумовлений наявністю довідкових даних [155] з процесу його горіння в кисні (α , T , склад продуктів згорання). Це забезпечує контроль достовірності результатів розв'язання прямої задачі при формуванні робочого тривимірного масиву;
- виконання вимоги знаходження пального в газоподібному стані для спирту забезпечується розглядом випадку знаходження його в пароподібному стані і відповідної цьому стану ентальпії.

Вихідні дані технологічних вимірів були імітовані результатами розв'язання прямої задачі для відповідних речовин. Розглядалося два варіанти завдання вихідних даних:

1. Імітація технологічних вимірів без урахування вимірювальних похибок. Метою є перевірка принципової працездатності запропонованого методу. Збіг чи відхилення певних складів горючих від заданих визначатиме розрахункова похибка роботи методу.

2. Імітація технологічних вимірів з внесеною похибкою вимірювань. Метою є оцінка впливу похибки вимірювань на точність визначення складу пального.

Варіант завдання вихідних даних не впливає на порядок формування робочого тривимірного масиву. Були прийняті наступні діапазони зміни вихідних даних:

– в (3.14):

$$\exists \bar{d}_H \in [0 \dots 4,95]: (\bar{d}_H)_i = \Delta d \cdot (i - 1) \quad \Delta d = 0,05 \quad \forall i \in [1 \dots 100];$$

$$\exists \bar{d}_O \in [0 \dots 4,95]: (\bar{d}_O)_i = \Delta d \cdot (i - 1) \quad \Delta d = 0,05 \quad \forall i \in [1 \dots 100]. \quad (3.15)$$

- коефіцієнт надлишку окиснювача α :

$$\exists \alpha \in [0,025 \dots 2,5]: \alpha_i = 0,025 + \Delta \alpha \cdot (j - 1) \quad \Delta \alpha = 0,025 \quad \forall j \in [1 \dots 100]. \quad (3.16)$$

- ентальпія палива I_t :

$$\begin{aligned} \exists I_t \in [-13500 \dots 8800] \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}: (I_t)_i &= -13500 + \Delta I_t \cdot (i - 1) \\ \Delta I_t &= 100 \quad \forall i \in [1 \dots 224]. \end{aligned} \quad (3.17)$$

У результаті знайдено розв'язки прямої задачі їх було $2,24 \cdot 10^8$. Для всіх комбінацій вихідних даних розраховані температури продуктів згорання і перераховані коефіцієнти надлишку окиснювача α у відношенні об'ємних витрат окиснювача і пального $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$. При використанні величин в десятковому вигляді для його розміщення було потрібно $\sim 2,7$ ГБт пам'яті. Після перетворення в бінарний вигляд обсяг зменшився до 1,2 ГБт.

Далі, виходячи з рішення прямої задачі, було імітовано точні виміри технологічних параметрів ($\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ і T_i). Використовуючи отримані значення зі

сформованого раніше робочого масиву, визначалися розв'язки зворотної задачі. Результати розрахунків наведено в табл. 3.2. У третьому стовпці наведено точні нормовані брутто-формули відповідних речовин з наведеними значеннями кількостей відповідних атомів. У четвертому стовпці приведені аналогічні формули, але з розрахованими наведеними значеннями атомів.

Таблиця 3.2

Нормовані розраховані і точні брутто-формули з наведеними значеннями кількості атомів

Раціональна формула	Нормована брутто-формула	Нормована брутто-формула з точним наведеним значенням кількості атомів	Нормована брутто-формула з розв'язаним наведеним значенням кількості атомів
CH_4	CH_4	CH_4	CH_4
C_3H_8	$\text{CH}_{2.67}$	$\text{CH}_{2.67}$	$\text{CH}_{2.67}$
$\text{C}_2\text{H}_5(\text{OH})$	$\text{CH}_3\text{O}_{0.5}$	$\text{CH}_3\text{O}_{0.5}$	$\text{CH}_3\text{O}_{0.5}$

Використання запропонованого методу при визначенні складу палива дозволило для розглянутих речовин (метан, пропан, етиловий спирт) отримати точне в рамках моделі рішення. При визначенні складу метану в разі розбиття інтервалу на сто інтервалів, знайдена кількість атомів водню завжди дорівнювала 4.

Розрахункова похибка може бути зумовлена лише ступенем дискретизації вихідних даних. У разі зменшення інтервалу розбиття в чотири рази кількість атомів водню визначалося з урахуванням розрахункової похибки і була в інтервалі $[3,95 \dots 4,05]$. Діапазон неоднозначності в цьому випадку зумовлений лише кроком дискретизації (3.15) цієї величини при вирішенні прямої задачі.

3.5.2. Моделювання технологічних вимірів з прийнятими похибками

Вихідні дані у вигляді технологічних вимірів було імітовано результатами розв'язання прямої задачі для метану, пропану і спирту. Було задано різні значення коефіцієнта надлишку окиснювача α як більш, так і менш одиниці. Для

них було розраховано температури T продуктів згорання і відношення $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$. Отримані значення приймалися в якості «поточних» вихідних даних. Вихідні дані для розв'язання зворотної задачі ідентифікації отримані з «поточних» шляхом зміни їх значень. Розглядалося рішення при всіх можливих комбінаціях максимального відхилення вихідних даних від «поточних» значень в інтервалі $\pm 1\%$ від прийнятого значення.

В даному випадку в якості розв'язку виступають діапазони можливих значень визначених величин. Не у всіх випадках є можливість знайти спільний діапазон для всіх варіантів розрахунків. Для підвищення точності розв'язку використовувалась збільшена, в порівнянні з теоретично необхідною, кількість замірів технологічних параметрів. В якості вирішення вибирався діапазон (рис. 3.3) з найбільшою кількістю збігів серед усіх вимірів технологічних параметрів. Таким чином, в якості розв'язку розглядається найбільш ймовірне значення величини, що визначається.

У результаті розв'язання отримані діапазони можливих значень кількості атомів водню в нормованих брутто-формулах і коефіцієнт надлишку окиснювача α при моделюванні стехіометричної реакції горіння:

— для метану

$$CH_{(3,7-4,1)} \text{ (точне значення } CH_4), \quad (3.18)$$

— для пропану

$$CH_{(2,5-2,75)} \text{ (точне значення } CH_{2,(6)}), \quad (3.19)$$

— для етилового спирту

$$CH_{(2,85-3,1)}O_{(0,45-0,55)} \text{ (точне значення } CH_3O_{0,5}) \quad (3.20)$$

Діапазон зміни α отриманий шляхом порівняння кількості молей кисню у відповідній стехіометричній реакції при граничних і точних значеннях кількості атомів водню у відповідних речовинах.

$$\begin{aligned} &\text{для метану } \alpha \in [0,96 \dots 1,01]; \\ &\text{для пропану } \alpha \in [0,98 \dots 1,01]; \\ &\text{для спирту } \alpha \in [0,96 \dots 1,01]. \end{aligned} \quad (3.21)$$

3.5.3 Вплив умов на результати моделювання визначення складу спалюваного газу методом бібліотеки

Запропонований метод розв'язання зворотньої задачі визначення складу спалюваного газу методом бібліотеки може бути застосований за певних умов:

- ТПВ, склад якого визначається, має перебувати в газоподібному стані;
- властивості пального і окиснювача в газоподібному стані підпорядковуються рівнянню ідеального газу;
- склад пального в процесі декількох технологічних вимірювань температури продуктів згорання і його об'ємних витрат не повинен змінюватися.

Перші дві умови для інженерних розрахунків можна вважати не жорсткими і здійснюваними за будь-якого складу палива. Розглянутий метод пропонується використовувати при визначенні змінного складу пального. Тому можливість виконання третьої умови необхідно розглянути додатково.

На першому етапі має бути виконано необхідну кількість технологічних вимірів до початку визначення складу пального. Наприклад, три вимірювальні експерименти T і $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ при замірах позначимо як $\{1, 2 \text{ і } 3\}$. На їх основі отримано відгуки вимірювальних експериментів визначається перший склад пального. Для подальшого розрахунку досить виконати тільки ще один вимірювальний експеримент $\{4\}$ і в якості вихідних даних використовувати $\{2,$

3 і 4} відгуки вимірювальних експериментів. Всі подальші розрахунки виконуються в такій же послідовності після поточного вимірювального експерименту. До того ж після кожного розрахунку знайдений склад пального порівнюється з результатами попереднього кроку. Отриманий збіг результатів розрахунку демонструє відсутність зміни складу пального на поточному кроці вимірювального експерименту. В іншому випадку необхідно відмовитися від використання результатів попередніх вимірювань. Виконати три вимірювальні експерименти і розрахувати новий склад пального, як на першому етапі. Далі за тим самим алгоритмом. Таким чином може бути виявлено момент часу зміни складу пального.

3.6. Висновки до третього розділу

1. Визначено загальний тип задачі, як зворотно некоректно поставленої і виділено її більш вузький клас — складна задача інтерпретації. Для вирішення визначеної задачі обрано метод бібліотеки.

2. Розроблено метод заповнення бібліотеки розв'язками прямої задачі у вигляді робочого тривимірного масиву. Для цього:

- запропоновано метод перетворення коефіцієнта надлишку окиснювача α як вихідного даного для прямої задачі. Отримана величина використовується в якості вимірюваного технологічного параметра при вирішенні зворотної задачі визначення складу палива;

- запропоновано метод перетворення вихідних даних прямої задачі в число-згортку (кількість атомів хімічних елементів в брутто-формулою і ентальпії палива), яке формується на основі позиційного принципу запису десяткових чисел.

3. Розроблено метод пошуку розв'язання складної задачі інтерпретації з даних, які отримані зі сформованого робочого тривимірного масиву шляхом застосування обмежень і послідовного виділення областей збігу даних.

4. Показано відсутність похибок, що вносяться до рішення алгоритмом запропонованого методу. При моделюванні точних технологічних вимірів розрахункові похибки зумовлені тільки дискретизацією вихідних даних при розв'язанні прямої задачі.

5. Визначено вплив точності вимірювань технологічних параметрів на похибку визначення складу пального. Величина похибки не перевищує допустимої для інженерних розрахунків величини.

РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ ПІРОЛІЗУ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ТПВ

Організація екологічних заходів відіграє головну роль в житті сучасного суспільства і стосується всіх галузей його життєдіяльності. Парадокс полягає в тому, що екологічні заходи, які проводяться, часто ведуть до збільшення витрат ресурсів і збільшують техногенний вплив на навколишнє природне середовище.

Як було показано раніше, термічна утилізація ТПВ відноситься до брудних методів переробки, але зараз не має альтернативи. Однією з головних причин забруднення викидів переробних термічних технологій є невідомий поточний склад утилізованих ТПВ. У результаті цього не вдається організувати керований вплив для оптимізації процесу горіння.

Тому в розділі буде реалізовано завдання розробки моделі системи автоматичного керування установкою піролізу і методу керованого піролізу для одержуваних продукт-газів з максимальною теплотвірною здатністю. Розв'язок дозволить раціонально утилізувати ТПВ з технологічного, енергетичного та екологічного аспектів.

У розділі будуть розроблені:

— імітаційна модель процесу піролізу, що дозволяє отримати продукт-газ з максимальною теплотвірною здатністю за відсутності або мінімальній кількості вуглистого залишку в залежності від складу ТПВ;

— системи автоматичного керування установкою піролізу ТПВ для забезпечення заданої витрати продукт-газу при нанесенні збурень витратою синтез-газу і складом вихідної сировини.

4.1 Модель установки піролізу як об'єкта керування

4.1.1. Моделювання процесу піролізу через брутто-формулу ТПВ.

У джерелах при розгляді процесів фільтраційного горіння в наададіабатичному режимі спираються на побудову макрокінетичних моделей [4]. У той же час в [125, 4, 126] відзначається, що при малих швидкостях компонентів реалізуються процеси їх перетворення, близькі до рівноважних. Моделювання на основі рівноважних процесів будуються з урахуванням ентальпій всіх потоків. У тому числі повинні враховуватися теплові втрати через поверхню установки в зовнішнє середовище. Моделі таких процесів існують [127], але вони складні в застосуванні. В силу несерйозності втрат енергії через поверхню установки в порівнянні з тепловими потоками, що виникають в процесі розглянутих реакцій, відмовляються від їх врахування при побудові моделей рівноважних процесів. Більш того, втрати через поверхню печі піролізу можуть бути зменшені за рахунок застосування теплоізоляції або навіть виключені при застосуванні заходів, описаних в [128].

Визначення кола дослідження як «фільтраційне горіння» в більшості відомих джерел передбачає розгляд реакцій, що тривають як процес окислення сировини, що переробляється, повітрям. До того ж ці екзотермічні реакції розглядаються як джерело теплової енергії для підтримки процесу горіння. У [126] розглядається можливість присутності в якості ендотермічних окиснювачів водяної пари і діоксиду вуглецю. У цьому випадку кисень повітря як окиснювач необхідний як реагент, який підтримує екзотермічну реакцію - джерело теплової енергії.

Для визначеності розглянемо ТПВ, в основі яких є деревина, картон та папір. Такий вибір зумовлений доступністю їх фізико-хімічних властивостей, бо загалом це целюлоза. У розглянутих джерелах при розгляді піролізу целюлози в процесі її нагрівання виділяється кілька стадій з позначенням їх температурних меж і направлення відповідних енергетичних потоків [129]:

—до температури $\sim 150^{\circ}\text{C}$ з споживанням енергії - сушка сировини;

—до температури $\sim 300^{\circ}\text{C}$ відбувається споживанням енергії для початкового розкладання з виділенням газоподібних продуктів і початком обвуглювання;

—при подальшому підвищенні температури відбувається розкладання сировини з виділенням великої кількості енергії.

Теплова енергія, що виділяється на останній стадії, може бути використана для розігріву ТПВ в наадиабатичному режимі.

Процес термохімічного розкладання ТПВ без використання повітря призведе до піролізу. Процес, організований з доступом повітря, призведе до горіння. До того ж ці два процеси можуть переходити один в інший. З цієї причини необхідно використання єдиного підходу, що дозволяє моделювати процеси піролізу і горіння в залежності від вихідних умов. Для цього використана модель, запропонована в [130]. Відмінністю є можливість врахування води в рідкому вигляді в складі вихідної сировини.

Розглянемо процеси, що протікають, допускаючи, що продукти реакції знаходяться в газоподібному або конденсованому (вуглистий залишок) стані. Це справедливо за умови рівноваги процесів, що тривають. Закон збереження речовини дозволяє визначити перелік елементів і їх кількості в продуктах реакції, виходячи з брутто-формули вихідної речовини. До його складу можуть бути включені і вода, і повітря в разі використання окиснювача. На основі обмеженої кількості основних хімічних елементів, які можуть входити до складу вихідної речовини (C, H, O, N), може бути визначений перелік основних речовин, що входять до складу продуктів реакції. Цей перелік ідентифікується на основі попередніх розрахунків, відомих експериментальних даних і включає в себе:



Тут C_U - вуглистий залишок. Ця умова виконується як при подачі на вхід установки піролізу продукт-газу, так і води. Температура в рівноважній зоні хімічної реакції визначається на основі закону збереження енергії. Він виражається в рівності ентальпій у вихідних продуктах і продуктах реакції.

Використовуючи прийняті допущення, узагальнена модель процесів побудована на основі методу, викладеного в [130].

Закон діючих мас для кожної з речовин (4.1), що входять до складу продуктів реакції записується рівнянням термохімічної рівноваги. На прикладі CO_2 , це рівняння має вигляд:

$$K_{CO_2}(T) = \frac{P_C \cdot P_O^2}{P_{CO_2}}. \quad (4.2)$$

Тут $K_{CO_2}(T)$ - константа хімічної рівноваги при температурі T для рівноважної реакції утворення CO_2 з елементів C і O є табличною величиною; P_{CO_2}, P_C, P_O – парціальні тиски відповідних компонентів в суміші продуктів згорання. Використання парціальних тисків замість концентрацій можливо в разі розгляду певної кількості молей M_T вихідної речовини замість одного моля. Значення M_T є додатковою невідомою величиною і підлягає визначенню.

Одна з особливостей моделі при використанні парціальних тисків замість концентрацій впливає на форму запису відповідного рівняння для вуглистою залишку. Рівняння має вигляд:

$$K_U(T) = \frac{P_C}{P_U}. \quad (4.3)$$

У даному рівнянні в процесі розв'язання величина P_U при заданій температурі, на відміну від інших величин парціальних тисків, залишається постійною.

Рівняння закону збереження записуються для кожного з хімічних елементів, що визначають вихідний склад речовини, у вигляді балансу її кількості в вихідну речовину і продуктах реакції. Рівняння записуються з урахуванням величини M_T вихідної речовини. Наприклад, для елемента C воно має вигляд:

$$M_T \cdot b \cdot C = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + P_U + P_C. \quad (4.4)$$

У лівій частині рівняння відображено кількість атомів вуглецю у вихідній речовині. Відповідно: b - кількість атомів в одному молі вихідної речовини.

Закон Дальтона. Поява змінної M_T для замикання системи вимагає введення додаткового рівняння. У його якості виступає сума парціальних тисків продуктів реакції, рівна тиску в печі піролізу.

$$P_{\Sigma} = \sum_i P_i. \quad (4.5)$$

Тут P_{Σ} - тиск газової фази в печі піролізу; P_i - парціальні тиски компонентів продуктів реакції. У цьому випадку також проявляється особливість, пов'язана з наявністю вуглистого залишку.

У стаціонарному режимі суміш продуктів реакції має таку ж брутто-формулу, як і вихідна сировина. Використання продуктів реакції в якості нагрівачого потоку не змінює склад отриманої суміші. Подача вихідної сировини лише збільшує її кількість. Це визначає особливість моделі.

4.1.2. Аналіз моделі об'єкта керування для вирішення завдання управління.

При проведенні процесу високотемпературного піролізу склад продуктів реакції визначається не тільки хімічним складом вихідного органічного

сировини, але і його вологістю. У таких процесах кількість фізично зв'язаної води в початкових продуктах впливає на склад продуктів реакції.

Для верифікації запропонованої моделі в якості вихідної речовини прийнята ТПВ, у ролі якої розглядається деревина, картон та папір в сухому стані з брутто-формулою $\text{C}_{\text{H}_{1,666}\text{O}_{0,833}}$. Пропонується присутність води враховувати як молярну частку ϕ в складі ТПВ. Наприклад, при $\phi = 0.1$ для 0.9 молей ТПВ береться 0.1 моль води. В цьому випадку результуючий 1 моль вихідної речовини має брутто-формулу $\text{C}_{0.885}\text{H}_{1,504}\text{O}_{0,681}$. Додавання повітря впливає на зміну брутто-формули суміші ТПВ + повітря та аналогічним чином враховується як молярна частка α від складу ТПВ з уже доданої водою. Для спрощення розрахунків склад повітря приймається як суміш кисню (21%) і азоту (79%) з брутто-формулою $\text{O}_{0,42}\text{N}_{1,58}$. У процесі розрахунку визначається температура рівноважної суміші продуктів реакції, при якій її ентальпія дорівнює ентальпії вихідної речовини.

У [4] відзначено, що при окисненні температура становить 1000...1200°C. Тому і в виконаних розрахунках температура в зоні рівноважних реакцій розглядалася до величини 1500 К. Водночас модель, що застосовується, таких обмежень не накладає. Результати розрахунків рівноважних температур при різних поєднаннях ступеня зволоженості вихідної сировини (ϕ) і кількості повітря, що вводиться в зону реакції (α) наведені [14]. Отримані значення показують, що при використанні зазначеної схеми організації процесу піролізу температури можуть досягати величин, що відповідають значенням в роботі [4] без додавання атмосферного повітря або при малій його кількості. Так при $\alpha=0$ (без повітря) і $\phi=0.4$ отримано $T = 1380 \text{ K}$ ($\sim 1100^\circ\text{C}$), а при $\alpha=0.1$ і $\phi = 0.4$ $T=1420 \text{ K}$ ($\sim 1150^\circ\text{C}$).

Особливістю запропонованої моделі є необхідність витрат значної кількості енергії для попереднього підігріву сировини. Для цього пропонується використовувати частину енергії продуктів реакції за рахунок регенеративного нагріву вихідної ТПВ до температури початку мимовільної реакції. Для прийнятих умов ця температура становить $\sim 400^\circ\text{C}$. Для значень α і ϕ , наведених

в [14], були виконані розрахунки по визначенню енергії при розкладанні ТПВ за рахунок охолодження продуктів реакції до температури $\sim 400^{\circ}\text{C}$ ($\sim 670\text{ K}$) і енергії, необхідної для нагріву вихідного ТПВ, до цієї ж температури.

Враховувалася енергія, необхідна для нагрівання ТПВ, повітря, води до 100°C , її випаровування і нагрівання пари, що утворилася. Результати розрахунку наведено в [14] у вигляді величини, рівної відношенню необхідної енергії до такої, що є. Ця величина показує, яку частину продуктів реакції необхідно використовувати для її підтримки.

Важливою характеристикою процесу піролізу служить величина вуглистого залишку. Використання різних окиснювачів для його зменшення істотно впливає на енергетичну цінність продуктів реакції. Кисень повітря підвищує температуру в реакційній зоні і зміщує реакцію в рівноважну область. Але водночас збільшується ступінь окислення продуктів реакції і падає їх енергетична цінність. Використання водяної пари підвищує вміст в продуктах реакції компонентів продукт-газу і збільшує енергетичну цінність продуктів реакції. Але така реакція вимагає великих енерговитрат, про що свідчать дані [14]. У той же час ці дані показують можливість тривання подібної реакції без використання кисню повітря або при малій його кількості. У [14] наведені результати розрахунку кількості вуглистого залишку для різних значень φ і α . Величини дані в молях вуглистого залишку на 1 моль вихідної речовини. Наведені дані показують можливість повного окислення вуглистого залишку вологого вихідної ТПВ без кисню повітря.

4.1.3. Результати моделювання продуктів утилізації ТПВ

Узагальнені величини, наведені в [14], були отримані на основі детальних розрахунків з визначенням складу продуктів піролізу в залежності від температури. У розглянутому випадку на відміну від реальної ситуації склад вихідної речовини відомий. У тому числі задається і її вологість. Це дозволяє виявити основні особливості процесу термічного розкладання.

Як приклад результатів детальних розрахунків, розглянемо процес піролізу ТПВ, які складаються з деревини, картону та паперу без доступу повітря при двох різних значеннях вогкості ТПВ. На рис. 4.1 представлений графік зміни складу продуктів піролізу ($\alpha=0$) в залежності від температури для випадку $\varphi=0$. Абсолютно сухого ТПВ не існує, але цей випадок цікавий з теоретичної точки зору його граничності. У силу рівноваги розглянутої реакції ентальпія вихідної сировини в даному випадку відома, величина дорівнює ентальпії продуктів піролізу.

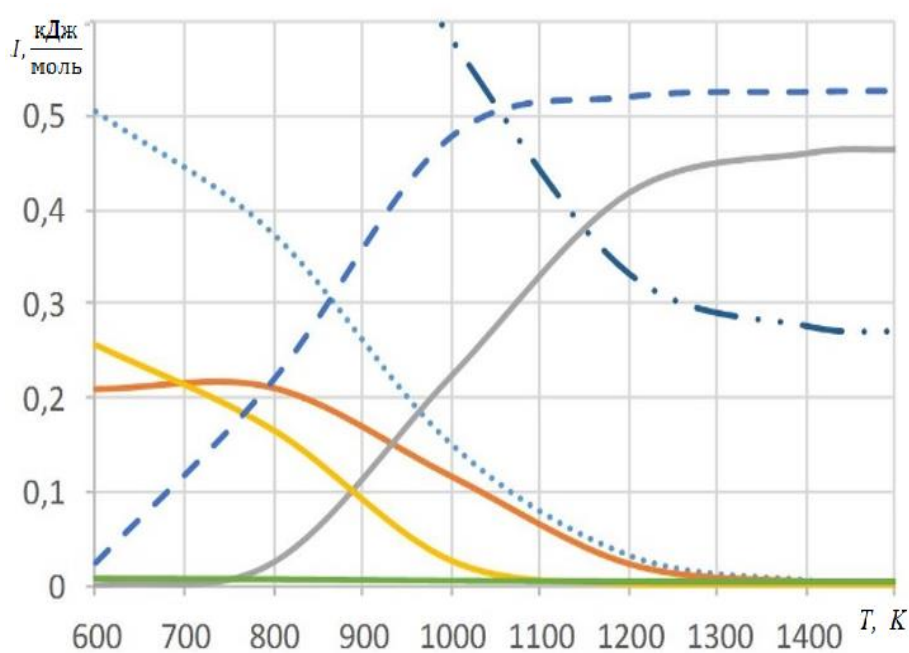


Рис. 4.1 Мольні частки продуктів піролізу в залежності від температури (K) при $\varphi=0$ і $\alpha=0$: H₂O, — CO₂, — CO, — CH₄, — H₂, — N₂, — у.

Це дозволяє визначити рівноважну температуру реакції. Результати розрахунку зміни ентальпії (кДж/моль) продуктів реакції наведені на рис. 4.2. Аналогічні результати піролізу ($\alpha=0$) для випадку вологого ТПВ при $\varphi=0,4$ наведені на рис. 4.3 і рис. 4.4.

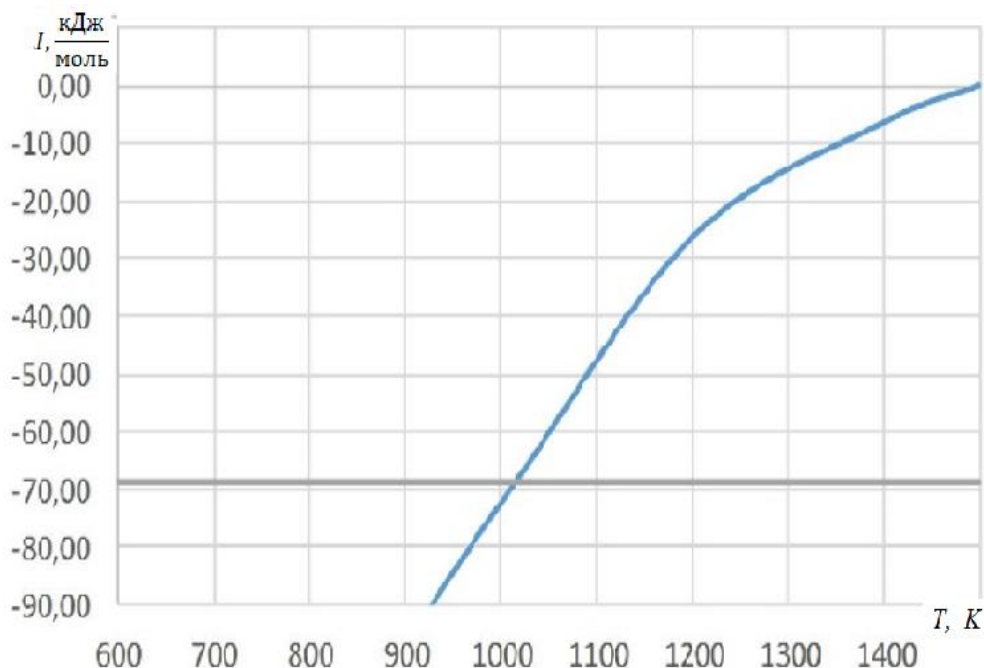


Рис. 4.2 Ентальпія продуктів піролізу (кДж/моль) в залежності від температури (К) при $\varphi=0$ і $\alpha=0$: — продукту — вихідної сировини.

Аналіз результатів модельного експерименту зроблений за даними графіків на рис. 4.2 і рис. 4.4 свідчить, що рівноважний процес піролізу для вологого ТПВ триває при більш високій температурі (~ 1350 К), ніж для сухого (~ 1000 К). Можливість піролізу вологого ТПВ при такій температурі без зовнішніх джерел теплової енергії забезпечується за рахунок організації наадиабатичного процесу піролізу. Слід зазначити, що при звичайному горінні ТПВ спостерігається зворотня ситуація: температура горіння сухого ТПВ більша, ніж вологого.

Порівняльний аналіз результатів розрахунків, відображених на рис. 4.1 і рис. 4.3, показує приблизно однакову величину мольних часток горючих газів: H_2 і CO при однакових температурах. Це при тому, що частка вуглецю в сухому ТПВ [14] вища, ніж у вологому. При проведенні піролізу сухого ТПВ в продуктах реакції велика частка вуглистого залишку. Зменшення цієї частки при переробці вологого ТПВ відбувається за рахунок окислення парами наявної води і кисню з вуглекислого газу. Такий процес і зумовлює збереження частки H_2 і CO при

зменшенні частки вуглецю у вихідній сировині. Особливо це помітно при порівнянні складів продуктів реакції для відповідних температур рівноважних процесів в першому і в другому випадках.

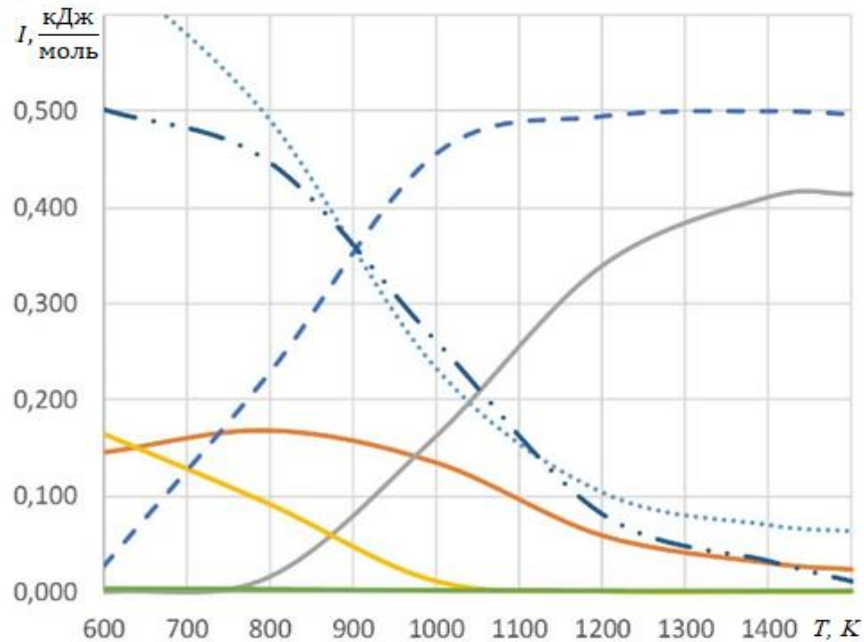


Рис. 4.3 Мольні частки продуктів піролізу в залежності від температури (К) при $\varphi=0,4$ і $\alpha=0$: H_2O , — CO_2 , — CO , — CH_4 , - - H_2 , — N_2 , — · · y .

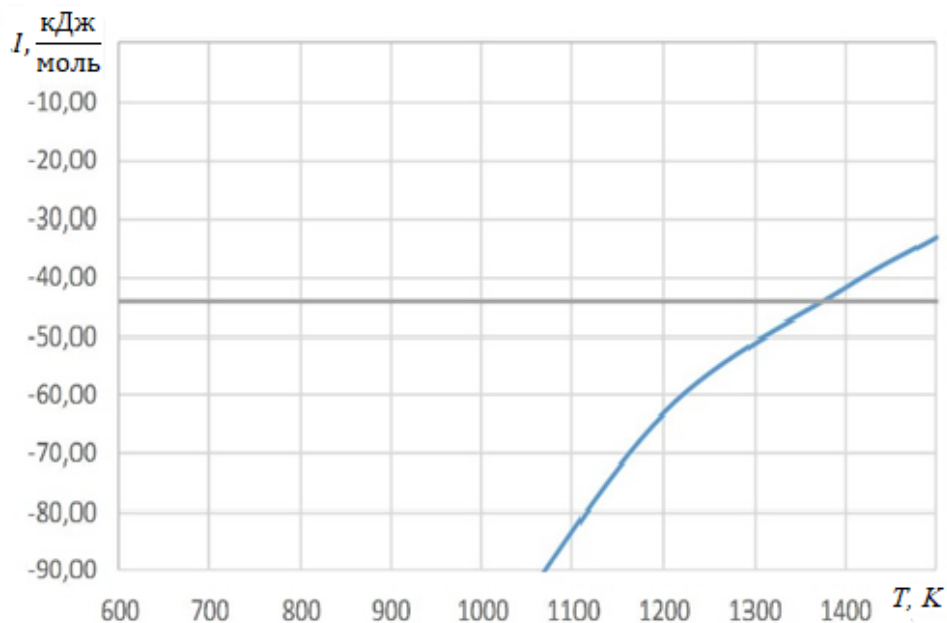


Рис. 4.4 Ентальпія продуктів піролізу (кДж/моль) в залежності від температури (К) при $\varphi=0,4$ і $\alpha=0$: — продукту — вихідної сировини.

4.2. Синтез автоматизованої системи керування установкою піролізу для одержання продукт-газу з ТПВ

4.2.1. Метод керування установкою піролізу

Завжди при утилізації ТПВ склад вихідної сировини невідомий. Більш того, склад ТПВ, що переробляється, залежить від часу його зберігання і з великою ймовірністю протягом часу може змінюватися. Для можливості утилізації ТПВ довільного змінного складу може бути використана технологія піролізу установкою безперервної дії, принципова схема якої приведена на рис. 4.5.

Принцип роботи для стаціонарного режиму схеми установки піролізу (рис. 4.5) такий. Через колектор матеріалу, що переробляється, (1) з витратою G_1 на вхід в піч піролізу (3) подається ТПВ. Через колектор продукт-газу II (2) на виході з печі піролізу з витратою Q_2 в загальний колектор надходить гарячий продукт-газ, де він розділяється на два потоки з витратами: Q_4 - газогін споживача (8) і Q_3 - по рециркуляційній лінії на вхід печі піролізу V (5) для сушки і нагріву вихідного ТПВ. Через колектор подачі повітря IV (4) подається необхідна кількість повітря з витратою Q_1 .

При стаціонарному режимі роботи установка дозволяє за відомими складом ТПВ і питомою теплотвірною здатністю, утилізувати ТПВ при подачі мінімально необхідної кількості повітря.

Водночас розраховується і регулюється подача з виходу установки піролізу частини [14] гарячого продукт-газу (II) (2) на її вхід (V) (5) для забезпечення наadiaбатичного процесу. В процесі експлуатації за допомогою спеціального ізоенальпійного пристрою (VII) (7) відстежується склад матеріалу, що переробляється, і при його зміні переходить в режим його визначення. У перехідних режимах при зміні складу ТПВ, в тому числі при запуску установки за допомогою пристрою

При стаціонарному режимі роботи в разі повного розкладанні ТПВ (вуглистий залишок відсутній) брутто-формула ТПВ відповідає брутто-формулі продукт-газу.

Склад продукт-газу i , відповідно, його сталість контролюється за допомогою пристрою VII (7). Робота пристрою побудована на основі методу [4] визначення брутто-формули суміші горючих газів в процесі їх спалювання [128]. Для цього достатньо заміряти витрати газової суміші, повітря і відпрацьованих газів в цьому пристрої при різних витратах суміші. До складу газової суміші можуть входити і не горючі гази.

При фіксації зміни складу продукт-газу в установку збільшується подача повітря і, отже, збільшується подача продукт-газу через колектор газгольдера IV (6) з метою гарантованого перетворення вихідної сировини зі зміненим невідомим складом в газоподібні продукти. Далі в пристрої VII (7) (рис. 4.5) визначається нова брутто-формула i , відповідно, новий склад ТПВ, що переробляється. Далі на підставі нових даних на піч піролізу встановлюється нова подача повітря відповідно до нової брутто-формули ТПВ, що переробляється.

4.2.2. Імітаційна модель САК установкою піролізу

На основі запропонованого вище методу керування установкою піролізу була розроблена імітаційна модель системи автоматичного керування, яка описує динамічні властивості установки за наступними каналами:

- витрата повітря Q_1 - витрата продукт-газу Q_2 ;
- витрата ТПВ $G_{ш}$ - витрата продукт-газу Q_2 ;
- витрата рециркуляційного продукт-газу Q_3 - витрата продукт-газу Q_2 ;
- витрата повітря Q_1 - температура піролізу t ;
- витрата вихідної сировини $G_{ш}$ - температура піролізу t ;
- витрата рециркуляційного продукт-газу Q_3 - температура піролізу t ;
- витрата повітря Q_1 - склад продукт-газу Q_H^p ;

— витрата ТПВ $G_{ш}$ - склад продукт-газу Q_n^p ;

Параметрична схема установки піролізу приведена на рисунку 4.6.

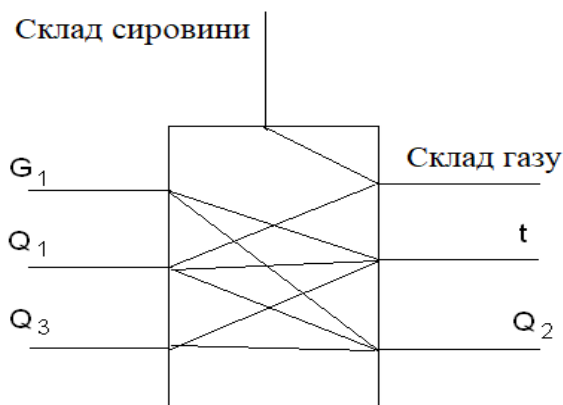


Рис. 4.6 Параметрична схема установки піролізу

Конструкція установки піролізу, що моделюється, ідентична конструкції топки з киплячим шаром. Топки з киплячим шаром вивчені досконало, тому їх динамічні властивості відомі. У роботах [133-136] наведені математичні моделі киплячого шару з точки зору управління температурою киплячого шару і обсягу газоповітряної суміші на виході з нього. Традиційно динамічні властивості об'єкта керування отримують на підставі розгляду законів збереження енергії і маси. За аналогією, для установки піролізу з топкою киплячого шару можна записати:

$$\frac{dT_L}{dt} S_L \rho_L c_L H_L = G_{\emptyset} Q_{i\emptyset}^{\delta} + Q_1 h_1 + Q_3 Q_i^{\delta} - Q_2 Q_i^{\delta} - I_{ash} - I_R, \quad (4.6)$$

де T_L - температура шару і температура продукт-газу;

S_L - площа дзеркала реакції піролізу;

ρ_L, ρ_g - насипна густина шару і густина продукт-газу;

c_L, c_g - теплоємність шару ТПВ і теплоємність продукт-газу;

H_L - висота шару;

G_{θ} - витрата вихідного ТПВ;

Q_1, Q_2, Q_3 - витрати повітря, продукт-газу, рециркуляційного газу;

$Q_{i\theta}^{\delta}$ - теплотвірна здатність ТПВ;

Q_i^{δ} - теплотвірна здатність продукт-газу і рециркуляційного газу;

I_{ash}, I_R - втрати теплоти, що відводиться золою і випромінюванням.

Після запису доданків рівняння (4.6) у вигляді приростів отримаємо рівняння в такому вигляді

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

або

$$\frac{S_L \rho_L H_L}{\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3} \frac{dT_L}{dt} + \Delta T_L = \frac{\bar{c}_{\theta} (T_L - T_{\theta})}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta G_{\theta} + \frac{\bar{G}_{\theta}}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_i^{\delta} + \frac{\bar{c}_1 (T_L - T_1)}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_1 + \frac{T_L}{(\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_3 - \frac{T_L}{(\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_2 \quad (4.7)$$

Вище було зазначено, що процес піролізу повинен вестися так, щоб ентальпії сировини і синтез газу були однакові. Це досягається забезпеченням нададіабатичного режиму процесу піролізу. Оскільки рециркуляційний газ - це частина продукт-газу, поданого назад в установку, то їх теплотвірна здатність однаково залежить тільки від температури тривання піролізу. Тому по каналах « $G_{in} - T_L$ », « $Q_1 - T_L$ », « $Q_2 - T_L$ », « $Q_3 - T_L$ » регульований апарат являє собою інерційну ланку першого порядку із запізненням. Транспортне запізнення визначається довжиною підвідних і відвідних газогонів.

З розгляду закону збереження маси всередині установки піролізу:

$$\frac{dm}{dt} = G_{\theta} + Q_1 + Q_3 - Q_2 \quad (4.8)$$

і рівнянь хімічної кінетики, розглянутих раніше, можна зробити висновок, що по каналах « $Q_1 - Q_2$ », « $G_1 - Q_2$ » « $Q_3 - Q_2$ » регульований апарат являє собою інерційну ланку. Інерційність об'єкту визначається швидкістю поширення фронту адіабатичного розкладання.

Взаємозв'язки між вхідними та вихідними параметрами печі піролізу, яку регулюють, можуть бути представлені у вигляді таблиці передавальних функцій. Коефіцієнти передачі передавальних функцій були визначені з розрахунку процесу піролізу та наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Передавальні функції за визначеними каналами для печі піролізу

	Витрата повітря Q_1 , моль/с	Витрата ТПВ G_1 , моль/с	Витрата рециркуляцій- ного газу Q_3 , моль/с	Теплотвірна здатність ТПВ, Q_H^P
Витрата продукт-газу Q_2 , моль/с	$W(s) = \frac{1}{T_1 s + 1}$	$W(s) = \frac{1}{T_1 s + 1}$	$W(s) = \frac{1.83}{T_1 s + 1}$	—
Температура піролізу T_L , C	$W(s) = \frac{600}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{300}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{300}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{200}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$
Теплотвірна здатність продукт-газу Q_i^δ ;	$W(s) = \frac{k \left(\frac{Q_2}{G_1} \right)}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{k \left(\frac{Q_2}{G_1} \right)}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$	—	$W(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$

Так як брутто-формула продукт-газу збігається з брутто-формулою ТПВ і залежить від кількості повітря, що подається, то, відповідно, склад продукт-газу визначається складом вихідної сировини і витратою повітря. Як параметр, що характеризує склад продукт-газу, обрана його теплотвірна здатність. Регульована піч піролізу по каналах «витрата повітря - склад продукт-газу» і «витрата ТПВ - склад продукт-газу» має нелінійні властивості. Ґрунтуючись на

результатах досліджень [131], [132] була прийнята квадратична залежність теплотвірної здатності продукт-газу від співвідношення витрат ТПВ і повітря.

$$Q_f^{\delta} = Q_{f0}^{\delta} (1 - k(Q_1 - G_{\phi} V_0)^2), \quad (4.9)$$

де Q_f^{δ} - теплотвірна здатність продукт-газу;

Q_{f0}^{δ} - максимально можлива теплотвірна здатність залежить від складу ТПВ, на даному етапі прийнято $Q_{f0}^{\delta} = 1$;

V_0 - обсяг повітря, необхідний для піролізу, 1 моль вихідної сировини та залежить від складу сировини.

k - коефіцієнт пропорційності визначається розрахунковим або експериментальним шляхом для конкретного складу сировини. На даному етапі прийнятий $k = 0.2$.

При розробці математичної моделі процесу піролізу залежність виділення енергії при окисненні ТПВ повітрям від його витрати і теплотвірної здатності була описана такою залежністю

$$Q = \bar{Q}_i^p \cdot \Delta G_1 + \bar{G}_1 \cdot \Delta Q_i^p + \Delta Q_i^p \cdot \Delta G_1 \quad (4.10)$$

Структурна схема об'єкта управління показана на рисунку 4.7. Так як постійні часу і величини запізнювання визначаються геометричними розмірами апарату і повинні уточнюватися індивідуально для кожної установки, то на даному етапі дослідження прийняті відповідно до експериментальних даних, отриманих в роботах [125, 126]: $T_1=400$ с, $T_2=500$ с, $\tau=10$ с.

У процесі дослідження моделі об'єкта управління було з'ясовано, що по каналу « $Q_3 - Q_2$ » можливі такі режими роботи, коли установка переходить зі стійкого стану в нестійке через наявність позитивного зворотнього зв'язку. Властивості об'єкта управління за вказаною каналу визначається співвідношенням між витратами ТПВ G_{in} і витратами рециркуляційного продукт-газу Q_3 .

При виробленні продукт-газу після установки піролізу встановлюється «мокрый газгольдер», позначений VI на рис.4.6, таке розташування дозволяє

мати буферну ємність для згладжування витрати продукт-газу при різких змінах його споживання. Крім того, зміна рівня в газгольдері може служити ще одним регульованим параметром, який показує небаланс між споживаним і кількістю продукт-газу, що генеруються.

Таким чином, в об'єкті регульованими параметрами є:

- рівень рідини в газгольдері;
- витрата продукт-газу;
- температура піролізу (продукт-газу);
- склад продукт-газу.

Керуючими впливами є:

- витрата вихідної сировини;
- витрата повітря;
- витрата рециркуляції продукт-газу.

Зовнішніми збуреннями на об'єкт є:

- задана витрата продукт-газу;
- склад вихідної сировини.

Схема АСР установки піролізу показана на рис.4.8.

Нижня група з семи блоків - підсистема екстремального регулювання. Ця підсистема знаходить максимум цільової функції $Q_I^{\delta} = f(Q_1)$, коректуючи завдання регулятора температури утилізованих ТПВ T .

На рисунку 4.8 застосовані наступні позначення:

Subsystem - об'єкт управління, описаний вище і структурна схема якого наведена на рисунку 4.5;

L_Control - регулятор рівня рідини в газгольдері;

T2_Control - регулятор температури піролізу;

Q2_Control - регулятор витрати продукт-газу;

U1, Y, U - блоки виводу графіків (*Scope*);

QG, Q4 - блоки завдання збурень;

Lz, Tz, Q2z - задатчики регуляторів.

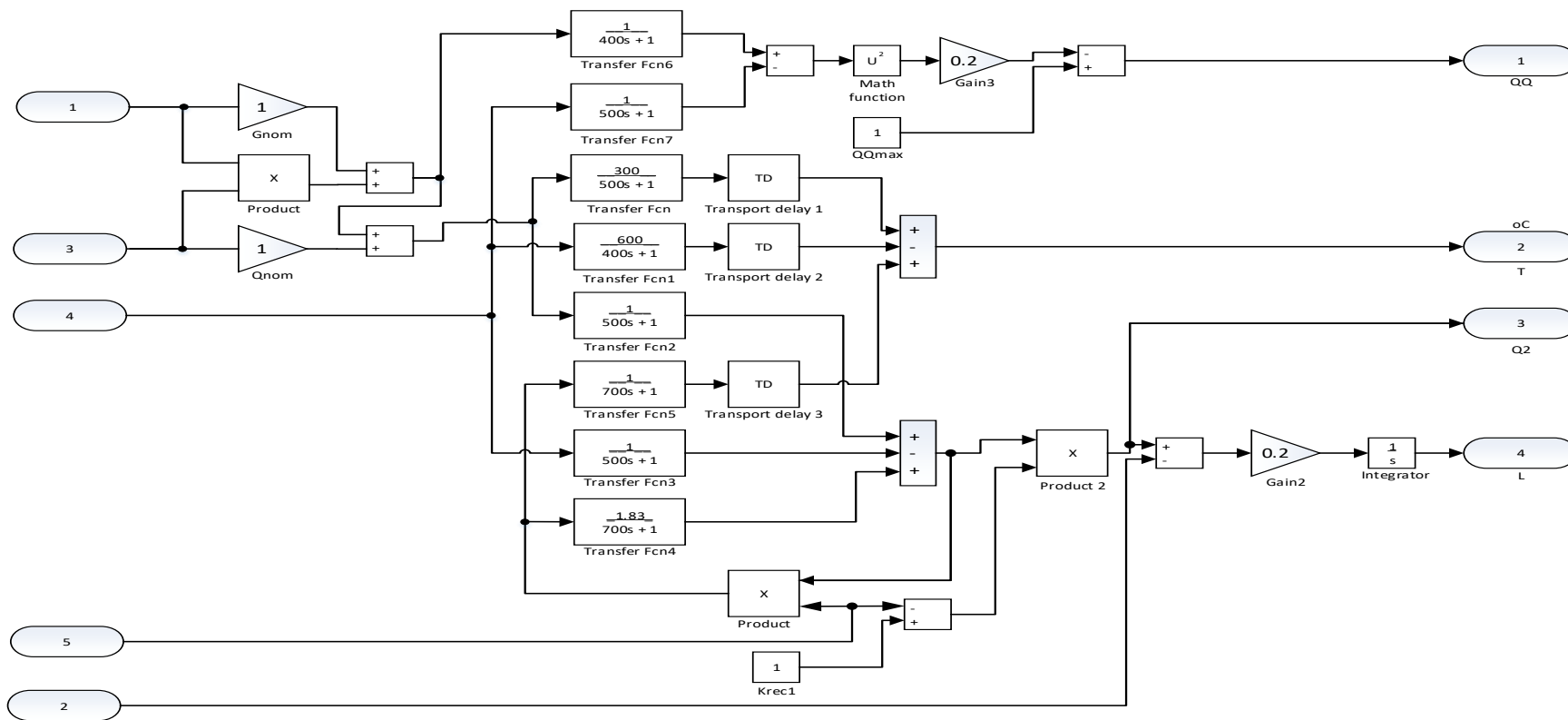


Рис. 4.7 Структурна схема імітаційної моделі печі піролізу

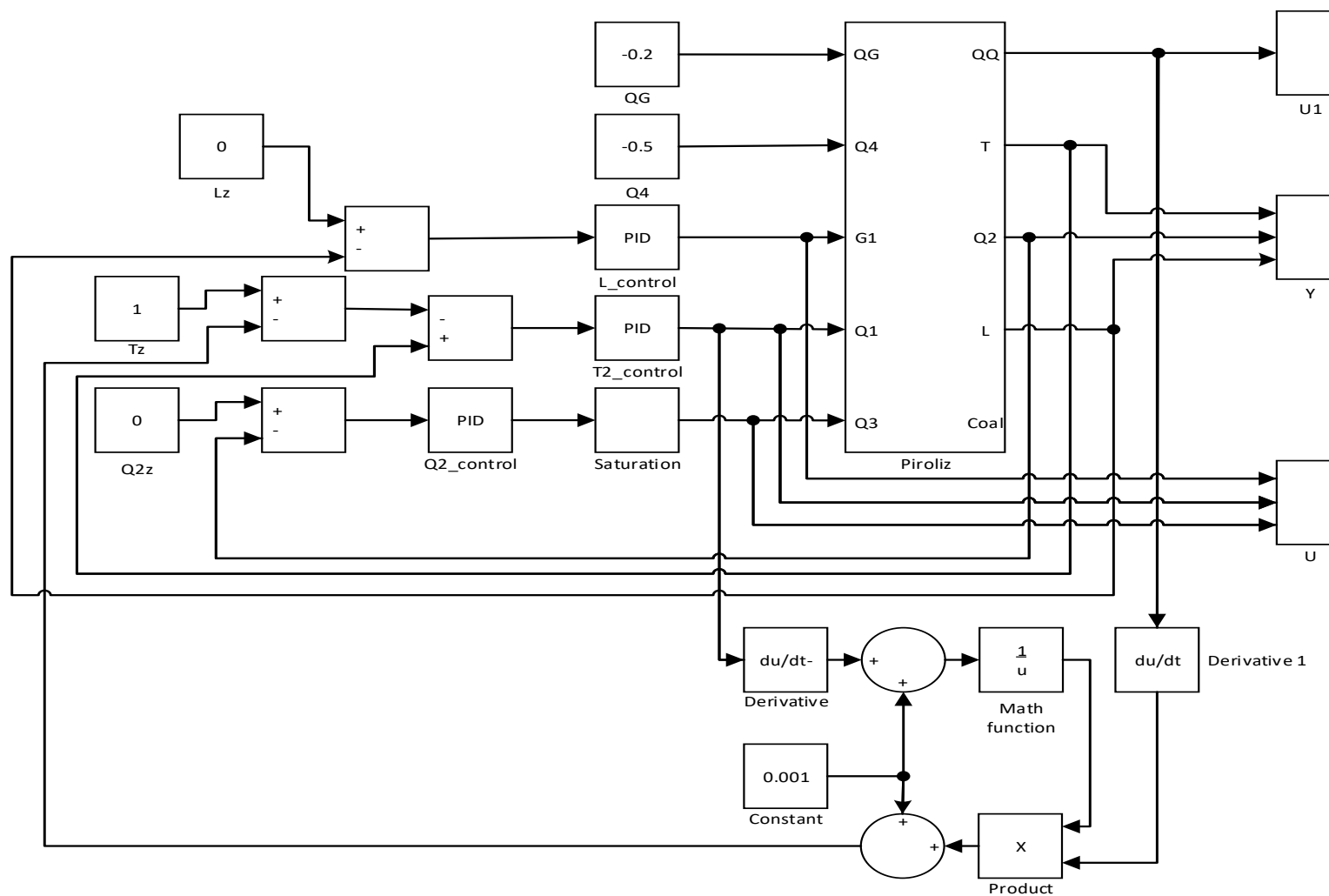


Рис. 4.8 Структурна схема імітаційної моделі АСР

4.3. Результати імітаційного моделювання САУ процесом піролізу.

На основі наведеної в 4.1 моделі установки піролізу була розроблена імітаційна модель 4.2, яка описує динамічні властивості об'єкта управління. За основними каналами установка піролізу, що регулюється, являє собою інерційну ланку першого порядку із запізненням. Постійна часу і величина запізнювання визначаються геометричними розмірами установки піролізу. Однак було виявлено такі режими роботи, коли установка переходить зі стійкого стану в нестійке через наявність позитивного зворотнього зв'язку. Це визначається співвідношенням між витратами ТПВ $G_{\text{тпв}}$ і витрати рециркуляційного продукту-газу Q_3 . Наявність регуляторів дозволяє стабілізувати технологічний процес піролізу на заданих значеннях.

Моделювання АСР показало, що на даному етапі досить сукупності одноконтурних регуляторів. Відключення будь-якого з регуляторів призводить до погіршення якості регулювання, але система в цілому продовжує стійке функціонування.

Також в процесі моделювання АСР було з'ясовано, що система регулювання досить добре компенсує збурення. Причому при співспрямованих збуреннях (зменшення витрат продукту-газу і зменшення теплотвірної здатності ТПВ або збільшення витрат продукту-газу і збільшення теплотвірної здатності ТПВ) досягається максимальне або мінімальне значення витрати продукту-газу. При різноспрямованих збуреннях (зменшення витрат продукту-газу і збільшення теплотвірної здатності або збільшення витрат продукту-газу і зменшення теплотвірної здатності вихідної сировини) теплотвірна здатність палива складає близько 98% від максимально можливого значення.

Процеси регулювання при нанесенні збурень витратою продукту-газу, який подається споживачеві і хімічним складом вихідних ТПВ відображено на рис.4.9 – 4.12.

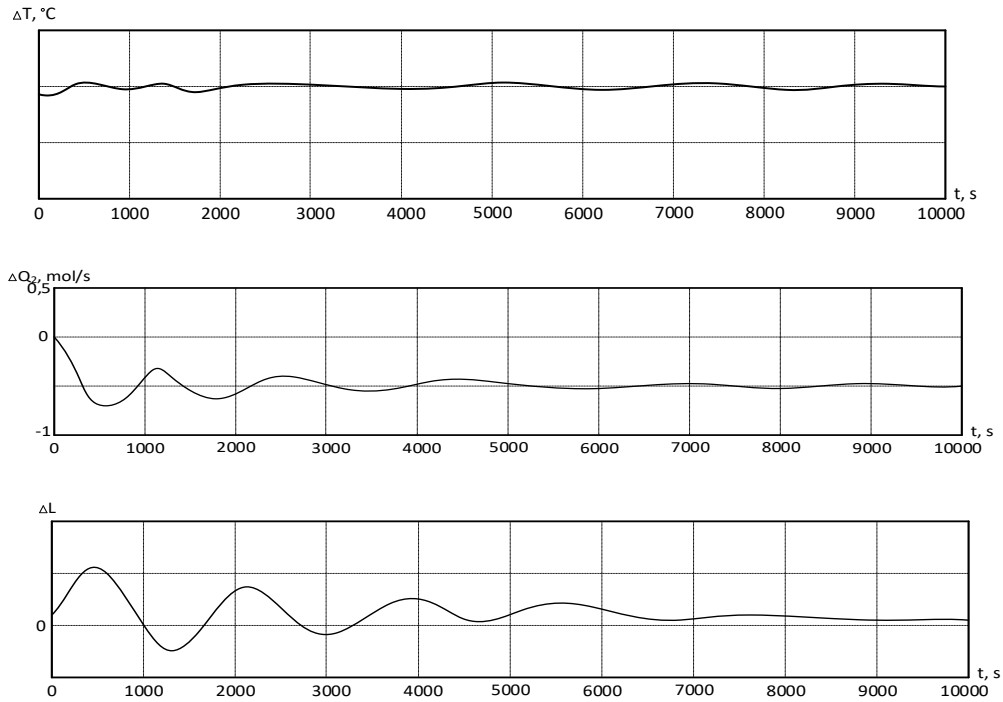


Рис. 4.9 Відхилення регульованих величин установки піролізу.
Збурення $\Delta Q_2 = -0.5$ моль/с, $Q_I^\delta = -20\%$

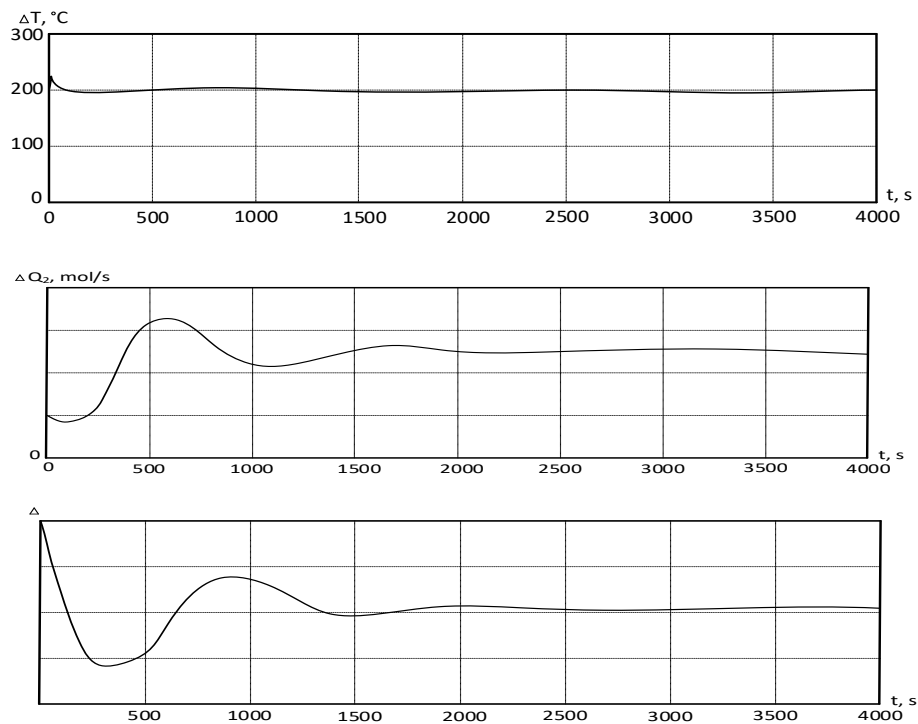


Рис. 4.10 Відхилення регульованих величин піролізної установки.
Збурення $\Delta Q_2 = 0.5$ моль/с, $Q_I^\delta = -20\%$

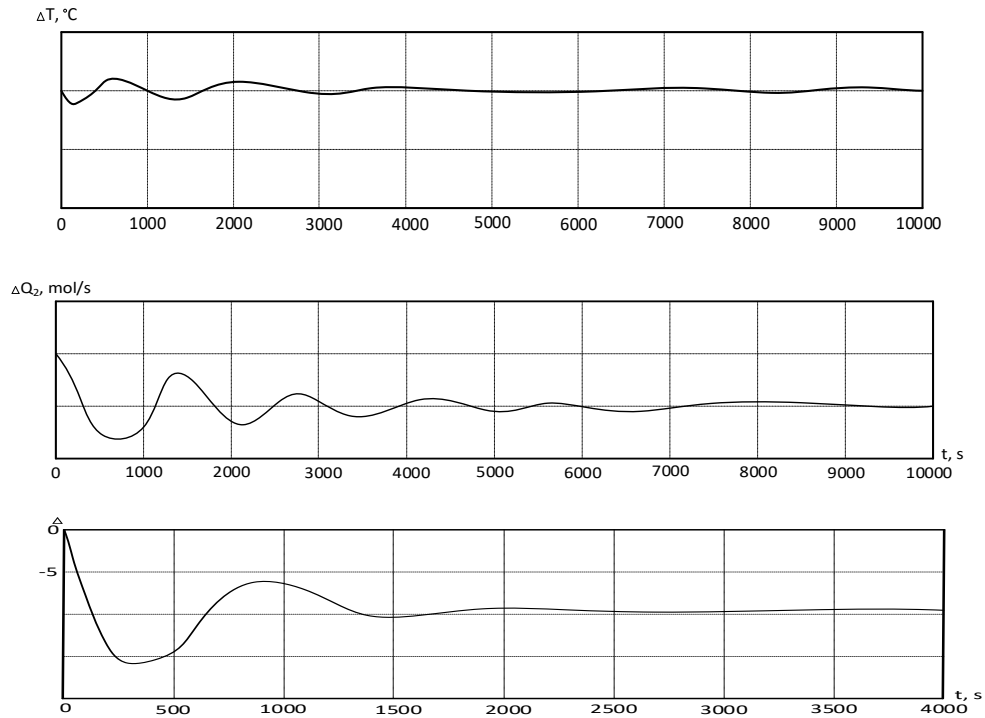


Рис. 4.11 Відхилення регульованих величин піролізної установки.

Збурення $\Delta Q_2 = -0,5$ моль/с, $Q_I^\delta = 20\%$

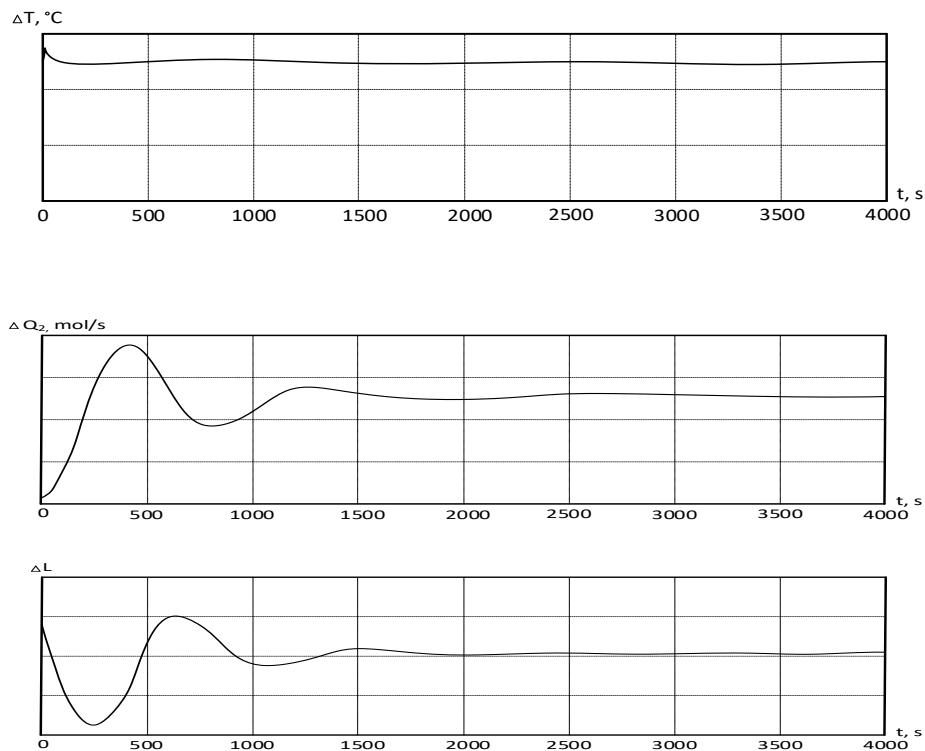


Рис. 4.12 Відхилення регульованих величин піролізної установки.

Збурення $\Delta Q_2 = 0,5$ моль/с, $Q_I^\delta = 20\%$

На систему наносилися наступні збурення: зміна витрати продукт-газу моль/с, зміна складу ТПВ, а саме відхилення теплотвірної здатності на 20% в

більшу або меншу сторону. Збурення наносилися як окремо поодиноці, так і спільно. На представлених рисунках показані перехідні процеси регулювання тільки при спільних збуреннях.

При дослідженні АСР також фіксувалася робота підсистеми оптимізації. Збурення наносяться на систему: зміна витрати продукт-газу $\Delta Q_2 = \pm 0,5$ моль/с, зміна складу ТПВ, а саме відхилення теплотвірної здатності на 20% в більшу і меншу сторону: $\Delta Q_{f\varnothing}^{\delta} = \pm 0,2$. Збурення наносилися як окремо, так і спільно. Пошук максимуму теплотвірної здатності продукт-газу показаний на рис. 4.13.

Перехідний процес регулювання питомої ентальпії продукт-газу шляхом зміни витрати повітря (екстремальний регулятор) при нанесенні збурень витратою продукт-газу ΔQ_2 і теплотвірної здатністю вихідного ТПВ $\Delta Q_{\text{нш}}^p$. Збурення наносилися одночасно.

Аналіз отриманих результатів показав, що система регулювання досить добре компенсує збурення. Причому при різноспрямованих збуреннях досягається максимальне значення теплотвірної здатності продукт-газу. При різноспрямованих збуреннях теплотвірна здатність палива складає близько 98% від максимально можливого значення.

Результати моделювання показали, що запропонована АСР утилізації ТПВ дозволяє найкращим чином перетворювати його в газоподібний стан. Реалізована поставлена мета, яка визначається можливістю отримання максимального обсягу суміші горючих газів при максимальній їх теплотвірної здатності. Отриманий результат зумовлений організацією процесу керування установкою піролізу в нададіабатичному режимі при відомому складі ТПВ. Організація такого процесу термічної переробки дозволяє використовувати ТПВ підвищеної вологості. Більш того, підвищення вологості сприяє збільшенню частки горючих речовин в продукт-газі.

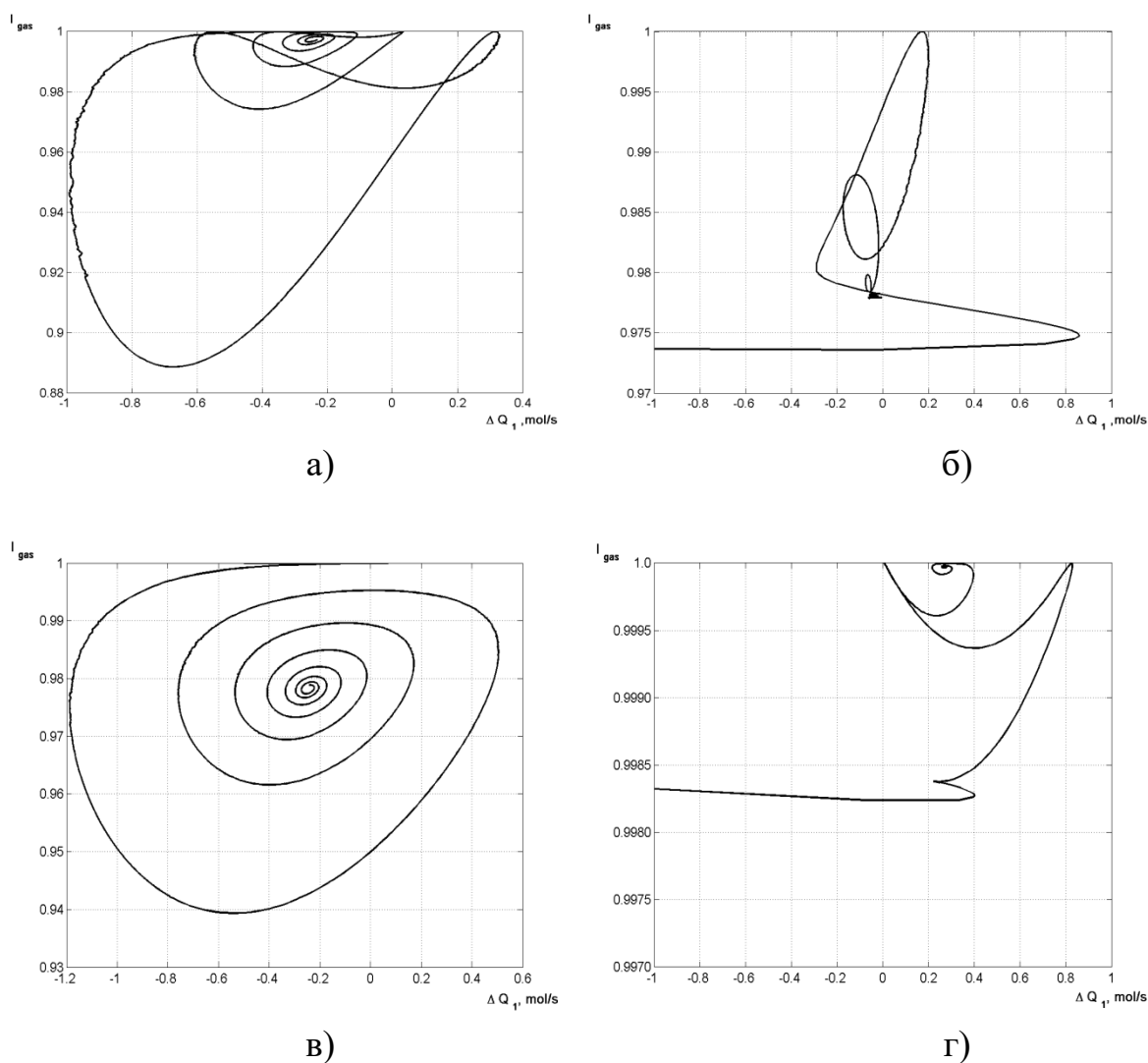


Рис. 4.13 Максимум теплотвірної здатності продукт-газу,

а- $\Delta Q_2 = -0.5 \text{ mol/s}$, $\Delta Q_{nch}^w = -20\%$; б- $\Delta Q_2 = 0.5 \text{ mol/s}$, $\Delta Q_{nch}^w = -20\%$;

в- $\Delta Q_2 = -0.5 \text{ mol/s}$, $\Delta Q_{nch}^w = 20\%$; г- $\Delta Q_2 = 0.5 \text{ mol/s}$, $\Delta Q_{nch}^w = 20\%$

Склад органічних побутових відходів в процесі переробки може довільним чином змінюватися. За рахунок введення в систему керування ізоентальпійного пристрою в режимі реального часу визначається склад газоподібних продуктів, отриманих під час піролізу і тим самим контролюється склад вихідних ТПВ. У разі його зміни визначається новий склад. На підставі отриманих даних установка під керуванням автоматизованої системи здійснює утилізацію ТПВ в іншому експлуатаційному режимі з новими параметрами, що розраховуються.

4.4 Висновки до четвертого розділу

1. Отримано імітаційну модель об'єкта керування установкою піролізу при нададіабатичному режимі проведення піролізу, що дозволяє розрахувати склад продукт-газу з максимальною теплотвірної здатністю при мінімальній кількості вуглистого залишку при будь-якому складі ТПВ. Максимальна теплотвірна здатність продукт-газу зумовлена тільки процесом переробки ТПВ в нададіабатичному режимі з можливим мінімально регульованим використанням повітря як окиснювача.

2. Визначено можливість існування рішень моделі об'єкта керування з енергетичного балансу. Отримане співвідношення енергії, яку зосереджено в продуктах реакції, що необхідно для підтримки процесу піролізу, забезпечує можливість організації процесу без повітря. Мінімальна кількість додаткового повітря або висока вологість ТПВ забезпечують максимальну теплотвірну здатність продукт-газу, що утворюється.

3. Розроблено метод автоматизованого керування піролізом ТПВ для забезпечення заданої витрати продукт-газу при нанесенні збурень витратою продукт-газу, складом і вологістю вихідного ТПВ.

4. Синтезовано імітаційну модель автоматизованої системи керування піролізною установкою, що дозволяє стабілізувати технологічний процес отримання продукт-газу на заданих технологічних значеннях. В об'єкті керування регульованими параметрами є: рівень рідини в газгольдері; витрата продукт-газу; температура тривання піролізу (продукт-газу); склад продукт-газу. Керуючими впливами АСР є: витрата ТПВ; витрата повітря; витрата рециркуляції продукт-газу. Зовнішніми збуреннями на об'єкт є: задана витрата продукт-газу і склад ТПВ.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором нові науково обґрунтовані результати, які представлені удосконаленими методами і моделями автоматизованої системи керування енергетичною установкою піролізу з термічної утилізації твердих побутових відходів за рахунок ідентифікації їх складу при нададіабатичному розкладанні для отримання продукт-газу максимальної теплотвірної здатності. Така автоматизована система керування дає можливість отримати максимальну теплотвірну здатність продукт-газу при розв'язанні оберненої і некоректно поставленої задачі пошуку найкращого рішення зі складу ТПВ при термічній утилізації. Отримані результати дозволили зробити такі висновки.

1. В Україні утворилося близько 10 млн т ТПВ. Їх морфологічний склад було класифіковано таким чином: харчові відходи – 54,2%, папір і картон – 16,3%, деревина – 3,5%, метали – 4,2%, текстиль – 6,7%, скло – 4,3%, пластмаса – 6,3%. На сьогодні перероблено та утилізовано лише близько 6,6 % , з яких 2,48 % спалено та 4,18 % потрапило на заводи переробки ТПВ, всі інші були захоронені чи вивезені на сміттєзвалища.

Доведено, що енергетична переробка є ефективним способом утилізації відходів, тому що їх обсяг суттєво зменшується і є можливість отримувати теплову енергію та, як наслідок, шкідливе навантаження на навколишнє середовище мінімізується. Завдяки цим факторам найбільшого поширення набули термічні способи утилізації ТПВ.

До технологій енергетичної переробки ТПВ відносяться: піроліз, спалювання на механічних колосникових решітках в шарових топках, спалювання в киплячому шарі, спалювання в барабанних печах, спалювання в металургійних печах. Існує технологія, де ТПВ використовують в якості додаткового палива для випалу клінкеру в цементних печах. В технологіях

енергетичної переробки під впливом температур утворюються високотоксичні органічні сполуки. Крім того, утворюється газоподібні речовини, що містять хлор, фосфор, сірку, фтор в результаті утворюються оксиди і кислоти HCl , HF , SO_3 , P_2O_5 .

При термічній утилізації ТПВ потрібно виконувати головне завдання, яке полягає в прийнятних обсягах викидів у навколишнє природне середовище шкідливих сполук, що утворюються. Це можливо виконати лише за умови використання автоматизованих систем керування і контролю над технологічним процесом, в основу яких покладено моделювання складу ТПВ.

2. Імітаційне моделювання різних груп ТПВ дозволило представити склад ТПВ умовною формулою, що дозволило їх класифікувати за чотирма групами. Класифікаційною ознакою стала кількість атомів в органічній сполуці нормована на один атом вуглецю. До першої групи потрапили ТПВ, які можна віднести до такої умовної формули CH_m , — вуглеводневі. До другої групи потрапили ТПВ, які можна віднести до наступної умовної формули CH_nO_m , — вуглеводневі ті, що містять кисень. До третьої групи було віднесено ТПВ, які можна віднести до наступної умовної формули $\text{CH}_n\text{O}_m\text{N}_k$, — вуглеводневі ті, що містять кисень, азот. До четвертої групи було віднесено ТПВ, які можна віднести до наступних умовних формул CH_nF_m , CH_nCl_m , CH_nS_m — вуглеводневі ті, що містять активні елементи. Показана оцінка розподілу сполук сірки, хлору і фтору по тракту піролізної установки. Для очищення газоподібних продуктів згорання ТПВ від «кислих» газів пропонується застосувати систему газоочистки, в основі якої лежить сухий лужний метод.

3. Розглянуті технологічні прийоми піролізу непідготовлених та попередньо підготовлених ТПВ з метою автоматизації процесу утилізації. Для автоматичного регулювання кількості підведеного тепла використовується вуглистий залишок, який утворюється в установці піролізу. Показано, що вуглистий залишок має теплотвірну здатність $Q_{\text{PH}}=30$ МДж/кг, вихід якого може досягати 30...35 % від маси ТПВ. Продукт-газ має теплотвірну здатність

$Q_{\text{рн}}=15\ldots 22$ МДж/н м³ і при частковій газифікації низькокалорійний газ $Q_{\text{рн}}=4\ldots 8$ МДж/н м³. Технологічна схема установки піролізу працює за технологією фільтраційного горіння, підігрів повітря для окиснювання здійснюється за рахунок охолодження продукт-газу, а в установку додатково для розкислення в ТПВ додається сухий порошок СаО або Na₂O.

4. Для синтезу системи автоматизованого керування визначено загальний тип задачі, як зворотно некоректно поставленої і виділено її більш вузький клас — складна задача інтерпретації. Для вирішення визначеної задачі обрано метод бібліотеки. Вперше запропоновано метод розв’язання оберненої і некоректно поставленої задачі як складної задачі інтерпретації з визначення складу ТПВ, що утилізується в установці піролізу. Для цього розроблено метод заповнення «бібліотеки» розв’язками прямої задачі, що дозволило вихідні дані прямої задачі, кількість атомів хімічних елементів в брутто-формулі ТПВ і їх ентальпію записати в число-згортку. Число-згортка формується на основі позиційного принципу запису десяткових чисел, що забезпечило формування тривимірного масиву з врахуванням послідовного виділення областей збігу даних і обмежень, що дало можливість отримати розв’язок задачі у вигляді брутто-формули продукт-газу максимальної теплотвірної здатності.

Отримано діапазони зміни коефіцієнта надлишку окиснювача α для різних речовин, які складають: для метану $\alpha \in [0,96 \ldots 1,01]$; для пропану $\alpha \in [0,98 \ldots 1,01]$; для спирту $\alpha \in [0,96 \ldots 1,01]$. Визначено вплив точності вимірювань технологічних параметрів на похибку визначення складу пального: для метану $CH_{(3,7-4,1)}$; для пропану $CH_{(2,5-2,75)}$; для етилового спирту $CH_{(2,85-3,1)}O_{(0,45-0,55)}$.

5. Отримано імітаційну модель автоматизованої системи керування піролізною установкою, яка існуючі розв’язки моделі об’єкта керування, а саме витрати рециркуляційного продукт-газу, мінімальну кількість додаткового повітря та існуючу вологість ТПВ використовує для розрахунку регульованих

параметрів. До яких належить: рівень рідини в газгольдері, витрата продукт-газу, температура тривання піролізу, склад продукт-газу. В АСР керуючими впливами є витрата ТПВ, витрата повітря, витрата рециркуляції продукт-газу, що компенсують зовнішні збурення, а саме витрата продукт-газу та склад ТПВ. Отримані розв'язки моделі об'єкта керування роблять можливим знайти стійке рішення для будь-якого співвідношення «зовнішні збурення – керуючі впливи АСР». Така побудова АСР дозволила отримувати продукт-газ з максимальною теплотвірною здатністю при мінімальній кількості вуглистого залишку при будь-якому складі ТПВ.

6. Результати роботи впроваджено в ТОВ «Аграрний інститут». Модельні зразки САК пройшли випробування в ТОВ «Украгро» та впроваджені в навчальний процес ДУ «Одеська політехніка» кафедри комп'ютерних технологій автоматизації в дисциплінах «Моделювання теплоенергетичного обладнання в АСУ», «Динаміка теплових процесів», «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів», «Структурна та параметрична оптимізація».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nur 16 Prozent des Plastikmülls werden wiederverwendet [Електронний ресурс] // Newspaper website Spiegel. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/plastikmuell-nur-16-prozent-werden-in-deutschland-wiederverwendet-a-1271125.html>.
2. Brunetkin O., Maksymov M.V., Maksymenko A., Maksymov M.M. (2019). Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 4/6 (100). 25–31. doi: 10.15587/1729-4061.2019.176422
3. [Guizani](#) C., [Jeguirim](#) M., [Valin](#) S., [Limousy](#) L., [Salvador](#) S. (2017). Biomass Chars: The Effects of Pyrolysis Conditions on Their Morphology, Structure, Chemical Properties and Reactivity. *Energies*. 2017. 10(6). 796. <https://doi.org/10.3390/en10060796>
4. Установка для визначення складу горючого газу в процесі його спалювання: пат. 120216 Україна: МПК G01N7/08, G01N25/20, № а201712785; заявл. 22.12.17; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 20/2019
5. Salganskiy Y.A., Fursov V.P., Glazov S.V., Salganskaya M.V., Manelis G.B. (2006). Model parovozdushnoy gazifikatsii tverdogo goryuchego v filtratsionnom rezhime. [Model of vapor-air gasification of solid fuel in the filtration mode]. *Fizika Goreniya i Vzryva [Physics of Combustion and Explosion]*. 2006. t. 42, № 1. s. 65-72. <https://docplayer.ru/86907583-Institut-problem-himicheskoy-fiziki-ran-chernogolovka.html>
6. Максимов М. В., Демиденко В. Е., Бутенко О. В., Брунеткін О. І. Модель піролізу органічних речовин змінного складу. *Інтегровані технології та енергозбереження* 2020. №3. С. (12-24). DOI: 10.20998/2078-5364.2020.3.02
7. Бутенко О.В., Ларіонова О.С. Імітаційна модель твердих побутових відходів як об'єкта керування. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія Технічні науки*. 2021. том 32 (71), Ч. 1, № 2. С. 235-245. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/37>.

8. Бутенко А.В. , Демиденко Э.В., Брунеткин А.И. Метод идентификации состава газообразного горючего. *Сучасні тенденції розвитку науки: Матеріали ІІ міжн. наук. -практ. конф., 17–18 березня 2018 р. (частина ІІ), Київ, МНЦД. 2018. С. 39-40.*

9. Бутенко А.В. , Демиденко Э.В., Брунеткин А.И. Метод ідентифікації складу газоподібного пального. *Перспективні напрямки наукової думки: Матеріали міжн. наук. -практ. конф., 18 квітня 2018 р. Том 5, Тернопіль, ГО «Європейська наукова платформа». С. (63-69)*

10. 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). P. 22–30. (SCOPUS).*

11. Бутенко О.В., Максимов М.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І. Метод пошуку розв’язання складної задачі інтерпретації для розв’язання зворотної задачі з визначення складу пального. *Суднові енергетичні установки. Науков-технічний збірник. Одеса, №39, 2019 С. 30–42.*

12. Максимов М. В., Максимов М. В., Демиденко В. Е., Бутенко О. В., Брунеткін О. І. Визначення складу палива для збройних сил України методом бібліотеки. *Збірник наукових праць НДЦ ЗСУ «Державний океанаріум» Інституту ВМС НУ «Одеська морська академія», №1(3), 2020 С. 102-110*

13. Бутенко А.В. , Демиденко Э.В., Брунеткин А.И. Разработка метода моделирования технических систем. *Science: discoveries and progress: Proceedings of articles the III International scientific conference. Czech Republic, Karlovy Vary – 2018, April, 28-29 / Editors prof. A.B. Belinskaya.*

14. Maksymov M. V., Brunetkin O. I., Beglov K.V., Alyokhina S.V., Butenko O.V. Automatic Control for the Slow Pyrolysis of Organic Materials with Variable Composition. *Advanced Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics River Publishers. 2021. Chapter 14. P. 397-430. ISBN:978-87-7022-341-6 (Hardback), ISBN:978-87-7022-340-9 (Ebook) (SCOPUS)*

15. Бутенко А.В., Демиденко В.Е., Максимов М.М., Максимова О.Б. Разработка метода определения целевой функции оптимизации энергетической установки. *Modern scientific challenges and trends: a collection scientific works of the International scientific conference.*, Warsaw, Poland, 20th October, 2018. / Warsaw, 2018. – Issue. 9. –P.128-133.

16. Butenko A.V., Demidenko V.E., Maksymova O.B. Development of the control system data ware and software for a heat supply variable structure system. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine: a collection scientific works of the International scientific and practical conference.*, Wloclawek, Republic of Poland, December 21-22, 2018. / Wloclawek. 2018. P.67 – 71.

17. Бутенко О.В. , Демиденко В.Е. , Бондаренко В.В. , Брунеткін О.І. Модель і метод визначення витрати продуктів згорання газів природного і штучного походження. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП_18_2018):* Матеріали XVIII міжн. наук. -практ. конф., 8–13 червня 2018 р., Одеса (Затока), С. (56-59).

18. 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.

19. 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.

20. Sharholly 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.

21. Ziadat A., Mott H. Assessing solid waste recycling opportunities for closed campuses. *Management of Env Quality*. 2005. Vol. 16, № 3. P. 250 – 256.

22. What a Waste: Global Review of Solid Waste Management. *World Bank. Urban Development*. 2012. No. 15. <http://hdl.handle.net/10986/17388>

23. Themelis N., Kim Y., Brady M. Energy recovery from New York City municipal solid wastes. *Waste Management & Research*. 2002. Vol. 20, № 3. P. 223 – 233.
24. Ahmed A. Environmental Properties of Waste By Product Materials Used in Constructions. *J solid waste techno mgmt*. 2014. Vol. 40, № 2. P. 160 – 169.
25. Zia H., Devadas V. Urban solid waste management in Kanpur: Opportunities and perspectives. *Habital International*. 2008. Vol. 32, № 1. P. 58 – 73.
26. Mickael D. Categorization and Sorting for Waste Management. *Int. J. Waste Resour*. 2008. Vol. 32, № 1. P. 58 – 73.
27. Jones A., Harrison R. Emission of ultrafine particles from the incineration of municipal solid waste. A review. *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 140, № 1. P. 519 – 528.
28. Bunce S. Seychelles Incinerator Sustainability Preliminary Study. *Sustainability for Seychelles*. January, 2010.
29. Kothari R., Tyagi V., Pathak F. Waste to energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, № 9. P. 3164 – 3170.
30. Heberlein J., Murphy A. Thermal plasma waste treatment // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41, № 5 – P. 53 – 61.
31. Tsang C., Apps J. Undegraund injection science and technology. *Amsterdam: Elsevier*. 2005. Vol 52. p.730.
32. Gutberlet J. Waste, poverty and recycling. *Waste Management*. 2010. Vol. 30, № 2. P. 171 – 173.
33. Про відходи: Закон України від 5.03.98 № 187/98. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 1998. №36 – 37. Ст. 242.
34. Систер В.Г., Мирный А.Н. Гюнтер Л.И. Экологические проблемы мегаполисов. – М.: Акад. коммун. хоз-ва им. К.Д. Памфилова, 2004. 431 с.
35. Сопилко Н.Ю. Переработка отходов: анализ мировых тенденций. *Твердые бытовые отходы*. 2011. №11. С. 42-44.

36. Бабанин И.В. Отходы в странах Европейского союза: статистика и динамика. *Твердые бытовые отходы*. 2011. №6. С. 68-71. <https://www.solidwaste.ru/magazine/archive/viewdoc/2011/6/1103.html>
37. Райзберг Б.А., Стародубцева Б.Б. Современный экономический словарь: Методологические указания. М.: ИНФА, 1999. 479 с.
38. Характеристика твердых бытовых отходов (ТБО). URL: http://scibook.net/injenernaya-ekologiya_1322. (дата зврнения 26.10.2018 г.)
39. Клинков А.С., Беляев П.С. и др. Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов: Учебное пособие. Тамбов: ТГУ. 2005. 80 с.
40. Акопова Г.С. Проблемы переработки промышленных и бытовых отходов и пути их решения: Методические указания. М.: иРУ газпром, 1999. 114 с.
41. Турченко О.К. Пластиковый Армагеддон. 2005. «Удачный выбор». № 40. С. 57-58.
42. Гринь С.А., Дреева А.С., Кызынгашева А.А. Проблемы утилизации твердых бытовых отходов в Украине. *Young Scientist*. 2018. №10. С. 411-415 С.
43. Тверді побутові відходи в Україні: Потенціал розвитку. Сценарії розвитку галузі поводження з твердими побутовими відходами: Підсумковий звіт. URL: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/504c5765-89d4-4be1-916e>
44. Мирный А.Н., Абрамов Н.Ф., Никогосов Х.Н., Скворцов Л.С. и т.д. Санитарная очистка и уборка населенных мест: Справочник / под ред. А.Н. Мирного. М. 2005. 383 с.
45. Петров Б.Г., Габайдуллин А.Г. и др. Рекомендации по расчету платежей за природопользование в Республике Татарстан. М.: Экспресс – ЗМ. Казань: «Татполиграф». 1998. 226 с.
46. Систер В.Г., Мирный А.Н., Скворцов Л.С., Абрамов Н.Ф., Никогосов Х.Н. Твердые бытовые отходы (сбор, транспорт и обезвреживание): Справочник. М.: АКХ им. К.Д. Панфилова. 2001.

47. Ильиных Г.В., Коротаев В.Н., Слюсарь Н.Н. Топливо из ТБО в цементных печах. *Экол. и пром-сть России*. 2011. Май. С. 12-15.
48. Михайлова Н.В., Феоктистов А.Ю. Термическая переработка отходов в цементной промышленности. *Твердые бытовые отходы*. 2009. №2. - С. 30-34.
49. Управління та поводження з відходами. Частина 2. Тверді побутові відходи: навчальний посібник / Петрук В. Г. та ін. Вінниця : ВНТУ. 2013. 243 с.
50. Добросердова Е.А., Федорова С.Ф. Организация и обращение с твердыми бытовыми отходами: Учебное пособие. Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2018. 83 с.
51. 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.
52. Beckmann M., Klepmann F., Martin J., Scholz R. Seifert H/ Classification of Waste-to-energy Plants in Terms of Energy Recovery. *VGB PowerTech*. 2007. №10. P. 76-81.
53. Guidelines on the Interpretation of the RI Energy Efficiency Formula for Incineration Facilities Dedicated to the Processing of Municipal Solid Waste According to Annex II of Directive 2008/98/EC on Waste.- 2011.- 33 p.
54. E.Stengler. Waste-to-Energy Roadmap towards 2035. URL: https://www.vivis.de/wp-content/uploads/WM9/2019_WM_001-014-Stengler.pdf
55. Управління та поводження з відходами. Частина 2. Тверді побутові відходи: навчальний посібник / Петрук В. Г. та ін. Вінниця : ВНТУ. 2013. 243 с.
56. Тугов А.Н., Рябов Г.А. Современные ТЭС, сжигающие бытовые отходы в циркулирующем кипящем слое (мировой опыт). *Энергохозяйство за рубежом*. 2008. № 5(240). С. 12-20.
57. Гречко А.В. Анализ энергозатрат и экологической безопасности при термических методах переработки твердых бытовых отходов. *Промышленная энергетика*. 2001. № 3. С.55-59.

58. Гречко А.В., Денисов В.Ф., Кубасов В.Л. Технология переработки бытовых отходов в барботируемом расплаве - решение вопросов экологии. Цветные металлы. 1995. № 5. С.28-31.

59. Гречко А.В., Калнин Е.И., Денисов В.Ф. Печь Ванюкова и ее использование для решения проблемы твердых бытовых отходов. Металлы. 1998. №6. С.3-11.

60. Гречко А.В. Современные методы термической переработки твердых бытовых отходов. Промышленная энергетика. 2006. № 9. С.48-50.

61. Попов А.Н., Волохонский Л. А. Использование электрометаллургических технологий для переработки твердых бытовых, медицинских и промышленных отходов. Сталь. 1995. № 9. С. 69-71.

62. Воловик А.В., Шелков Е.М., Долгоносова И.А. Переработка бытовых и промышленных отходов в высокотемпературной шахтной печи. Экология и промышленность России. 2001. Октябрь. С.9-12.

63. Усачев А.Б., Роменец В.А., Баласанов А.В. и др. Переработка промышленных и бытовых отходов в агрегатах с жидкой шлаковой ванной. Экология и промышленность России. 1998. Ноябрь. С.27-30.

64. Утюмов А.Ю., Пермьяков В.Г., Русских С.А. и др. Пирометаллургическая технология безотходной утилизации городского мусора. Безопасность труда в промышленности. 1998. № 11. С.34-35.

65. Токовой О.К., Строганов А.И., Знамеровский В.Ю., Наумова М.В. Применение металлургических агрегатов для сжигания твердых бытовых отходов. Проблемы экологии Южного Урала. 1996. № 4. С.30-37, 46.

66. Семенов В.Н., Комарова Л.Г., Комаров Л.Н., Чижов Д.И. Технология сжигания твердых бытовых отходов в шлаковом расплаве. Технология металлов. 1999. № 6. С.34-38.

67. Веников В.А., Журавлёв В.Г., Филиппова Г.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учеб. для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 464 с.

68. Плетнёв Г.П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций. М.: Изд-во МЭИ, 1995. 353 с.
69. Лесничук А.Н., Лошкарёв В.А., Плетнёв Г.П. и др. Использование сигнала по тепловосприятию топочных экранов для оценки теплонапряженности поверхностей нагрева барабанного котла. *Вестн. МЭИ*. 1999. № 3. С. 56–60.
70. В.Я. Ротач, В.П. Зверьков и др. Функции автоматизированной настройки в микропроцессорных автоматических системах управления – состояние, перспективы, подготовка пользователей. *Теплоэнергетика*. 1993. М. С. 2–7.
71. Гительман Л.Д., Ратников Б.Е. Энергетический бизнес: учеб. пособие. М.: Дело. 2006. 600 с.
72. 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. Т. 61. № 12. С. 905–910.
73. Казаринов Л.С., Шнайдер Д.А., Кинаш А.В., Колесникова О.В. Корреляционно-экстремальная система управления энергетической эффективностью паровых котлов. *Вестник ЮУрГУ*. 2010. № 2. С. 81–85.
74. Журавлев А.А., Шит М.Л., Попонова О.Б., Шит Б.М. Синтез и анализ законов управления системой регулирования уровня в барабане газомазутного парового котла с учетом экономии энергоресурсов. *Проблемы региональной энергетики*. 2005. № 1. С. 43–52.
75. Акользин А.Н. Система автоматического управления водонагревательным котлом. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2013. № 5 (142).
76. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А. Автоматизированная система регулирования расхода топлива на ТЭЦ. *Информатика и системы управления*. 2011. № 2 (38). С. 157–168.

77. Медведев А.Е., Волюков К.П.. Автоматическое управление тягодутьевым трактом водогрейного угольного котла. *Вестник КузбГТУ*. 2009. № 6. С. 49–52.

78. Богданов А.В. Система управления паровым котлом на основе многомерного четкого логического регулятора. *Научно-технич.вестник Поволжья*. 2011. № 6. С. 108–115.

79. Система автоматического регулирования уровня воды в барабане котла: пат. 159833 России: МПК F22B35/00 / Е.Л. Еремин, Д.А. Теличенко; Заявитель и патентообладатель: Амурский государственный университет, Благовещенск – заявл. 29.06.2015.

80. Шкаровский А.Л. , Новиков О.Н. , Новикова А.В., Полушкин В.И. Разработка нового семейства интеллектуальных систем управления качеством сжигания топлива. *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 12-3. С. 556– 561.

81. Земцов Н.С. , Французова Г.А. Синтез ПИД-регулятора для системы управления прямоточным котлом. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2015. № 9. Т. 16. С. 631–636.

82. 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. Т. 64. № 2. С. 151–160.

83. Казаринов Л.С., Игнатова Т.А., Кинаш А.В., Колесникова О.В. , Шнайдер Д.А. Оперативное регулирование экономичности горения в энергетических котлах. *Вестник ЮУрГУ*. 2008. № 17. С. 21–23.

84. Белавкин И.В., Казаринов Л.С. Оптимизация режимов энергетических котлов при сжигании ВЭР. *Вестник ЮУрГУ*. 2013. № 2,Т.13. С. 25–31.

85. Казаринов Л.С., Кинаш А.В., Зозуля А.И. Многосвязная система оптимального регулирования экономичности потребления топлива. *Вестник ЮУрГУ*. 2011. № 2. С. 64–69.

86. Финаев В.И., Белоглазов Д.А., Павленко Е.Н., Шадрина В.В. Система автоматической оптимизации в условиях неполноты данных на примере барабанного котла. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2014. № 11 (160). С. 227–234.

87. Канюк Г.И., Мезеря А.Ю., Лаптинова Е.В. Модель энергетических потерь в котле тепловых электростанций и возможные пути их минимизации. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2015. № 2 (27). С. 79–82.

88. Степанец А.В., Коропова Л.А. Аудит качества работы алгоритмов управления барабанных паровых котлов на стадии проектирования системы автоматизации. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 2 (23). Т. 3. С. 8–12.

89. Ильин И.В., Машкин А.Н., Симин В.В., Уваров Е.А., Рубахин В.Е. Совершенствование автоматизированной системы управления и контроля парового котла, работающего под давлением. *Безопасность труда в промышленности*. 2015. № 10. С. 86–89.

90. Кожевникова Н.Ю., Фомин В.Ю., Хасанов А.Р. Оптимизация систем управления паровыми котлами на теплоэлектростанциях. *Новое слово в науке: перспективы развития*. 2015. № 4 (6). С. 151–153.

91. Конопацкий Ю.В. Оптимизация параметров системы управления котлоагрегата методом полного перебора. *Информационные технологии в экономических и технических задачах: матеріали міжн. наук.-практ. конф., Пенза, 24-25 марта*. 2016. С. 192–194.

92. Волков И.С. Математическая модель турбонаддувочного агрегата парового котла. *Системы управления и обработки информации*. 2017. № 2 (37). С. 9–23.

93. 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.

94. Борисов Г.Б. Анализ современных систем автоматизации котельных / Г.Б. Борисов. *Теплоэнергетика*. 2010. №6. С. 2–11.

95. Зражевский Р.А., Коновалов В.И., Курганов В.В., Бурмантов Д.Г. Моделирование цифровых регуляторов уровня в барабане парового котла. *Вестник науки Сибири*. 2011. № 1(1). С. 344–348.

96. Богданов А.В. Программная реализация нечеткого регулятора в системе управления парового котла ТЭС для адаптации ПИД-регулятора. *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2-2. С. 182–189.

97. Кулаков Г.Т., Горелышева М.Л. Комплексная методика оптимизации параметров динамической настройки регуляторов впрысков. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2009. № 3. С. 59–66.

98. Кулаков Г.Т. , Горелышева М.Л. Исследование влияния относительной постоянной времени инерционного участка пароперегревателя на качество пара за котлом в широком диапазоне изменения нагрузок. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2008. – №5. – С. 53–60.

99. Журавлев А.А. , Шит М.Л., Попонова О.Б., Шит Б.М. Проектирование закона управления системой регулирования подачи топлива парового котла с учетом требований экономии энергоресурсов при управлении. *Проблемы региональной энергетики*. 2005. № 1. С. 34–42.

100. Управление техническими системами в условиях неопределенности: монография. / Е.Л. Еремин и др.. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. 211 с.

101. Катин ВД. , Колмогоров А.Н. , Кожин Н.А. Пути рационального использования топлива и вторичных энергетических ресурсов в

технологических печах НПЗ. *Нефтепереработка и нефтехимия* : НТИС. – М.: ЦНИИТЭ Нефтехим. 1994. № 6. С. 34–36.

102. Ещенко А.А. Проблемы автономного управления в системе регулирования уровня в барабане и давления пара в котле. *Вестник ИрГТУ*. 2012. № 5 (64). С. 158–162.

103. Авдеева О.В. Система экстремального регулирования горением топлива в котельной установке. *Вестник Пензенского государственного университета*. 2015. № 3 (11). С. 167–174.

104. Лузин П.А. , Дунаев М.П. Регулирование температуры перегретого пара котельного агрегата. *Вестник ИрГТУ*. 2016. № 5 (112). – С. 120–128.

105. Шульгин С.К., Юрков В.А., Синепольский Д.О. Система гибридного параллельного нейроуправления температурой перегретого пара в котлоагрегате. «Новые задачи технических наук и пути их решения» : матеріали міжн. наук.-практ. конф.. Пермь, 10 ноября 2016. С. 193–196.

106. Павленко Е.Н. Формализация функционирования паровых котлов на основе технологической схемы. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2008. № 7(84). С. 206–213.

107. Клишин В.А., Швецов П.В. , Хуторной Н.В., Кошелев А.Е. Система автоматического управления и регулирования котлом № 1 паровоздуховодной станции ОАО "ЗСМК". *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2007. № 1. С. 10–13.

108. Шнайдер Д.А., Казаринов Л.С. Метод упреждающего управления сложными технологическими комплексами по критериям энергетической эффективности. *Управление большими системами*. 2011. № 32. С. 221– 239.

109. Павленко Е.Н. Особенности управления и моделирования технологических процессов в паровых котлах в условиях неопределенности. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2008. №4(81). С. 184–188.

110. Новиков О.Н., Артамонов Д.Г., Пикаровский А.Л. Энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива в котлах и печах регулированием соотношения «топливо-воздух». *Промышленная энергетика*. 2000. № 5. С. 57–60.
111. Dou Z., Sun L. Design of Temperature Controller for Heating Furnace in Oil Field. *2012 International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering. Physics Procedia* 24 (2012) 2083 – 208;
112. Способ автоматической оптимизации процесса сжигания топлива переменного состава: пат. RU 2647940 Россия: F23C1/02; заявл. 04.05.2017; дата регистрации 21.03.2018.
113. Pitel' J., Mizáková J., Hošovský A. Biomass Combustion Control and Stabilization Using Low-Cost Sensors . 2013. *Advances in Mechanical Engineering*, Volume 2013, Article ID 685157, 7 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/685157>
114. Morales S.A. , Barragan D.R., Kafarov V. 3D CFD Simulation of Combustion in Furnaces Using Mixture Gases with Variable Composition. *Chemical Engineering Transactions*. Volume 70, 2018, Pages 121-126, doi: 10.3303/CET1870021
115. Buldakov M.A., B.V. Korolev, I.I. Matrosov, D.V. Petrov, A. A. Tikhomirov Raman gas analyzer for determining the composition of natural gas. *Journal of Applied Spectroscopy March*. 2013, Volume 80, Issue 1, pp 124–128 doi: 10.1007/s10812-013-9731-6
116. Schorsch S. (et al.). Development of an Analyzer System for Real-time Fuel Gas Characterization in Gas Turbine Power Plants. *Chemie Ingenieur Technik*. Vol. 83, Issue 3. March, 2011. P. 247-253 doi.org/10.1002/cite.201000095
117. Bárbara D.L. (et al.). Methane combustion kinetic rate constants determination: an ill-posed inverse problem analysis. *Química Nova*. vol.36, no.2. São Paulo. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422013000200011>

118. Rousta K., Ekström K.M. (2013). Assessing incorrect household waste sorting in a medium-sized Swedish city. *Sustainability*. 2013. V. 5. P. 4349–4361. DOI: <https://doi.org/10.3390/su5104349>

119. «America's 'recycled' plastic waste is clogging landfills, survey finds». Newspaper website The Guardian.URL.: <https://www.theguardian.com/us-news/2020/feb/18/americas-recycled-plastic-waste-is-clogging-landfills-survey-finds>

120. Darryl F., Kate F. «A giant wave of plastic garbage could flood the U.S., a study says»: Newspaper website The Washington Post. June 20, 2018. URL.: <https://www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2018/06/20/a-giant-wave-of-plastic-garbage-could-flood-the-u-s-in-10-years-a-study-says/?noredirect=on>

121. Петер Курт. Импорт или переработка как Германии избавиться от пластиковых отходов. Newspaper website DW. URL: <https://www.dw.com/rua-47226164>

122. Perrot J.F., Subiantoro A. Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand. *Sustainability*. 2018. 10(9), DOI: 10.3390/su10093114

123. 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>

124. Akhmetov S.A., Serikov T.P., Kuzeev I.R., Bayazitov M.I. Technology and equipment of oil and gas refining processes. St Petersburg: Nedra. 2006. 872 pp.

125. Nadia H.L., Leibbrandt N.H., Aboyade A.O., Knoetze J.H., Görgens J.F. Process efficiency of biofuel production via gasification and Fischer–Tropsch synthesis. *Fuel*. V. 109. 2013. P. 484–492. DOI: doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.013

126. Глазов С.В., Полианчик Е.В. Polianchik Ye.V., Glazov S.V. Фильтрационное горение углерода в присутствии эндотермических окислителей. *Физика горения и взрыва*. 2015. № 5. С. 34–43.

127. 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.

128. Установка для визначення складу горючого газу в процесі його спалювання: пат. 120216 Україна: G01N 7/08 (2006.01), G01N 25/20 (2006.01). №.а201712785; заявл. 22.12.2017; опубл. 11.06.2018, Бюл. №11.

129. Лямин В. А. Газификация древесины. М.: Лесная промышленность. 1967. 264. с.

130. Glushko, V.P., (Ed). Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products: a handbook (Vols 1-6). Moscow, Soviet Union : All-Union Institute of Scientific and Technical Information, vol. 1.1971. 266 с

131. 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.

132. 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.

133. 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.

134. Wolfgang Rodi, Mulas M. Engineering Turbulence Modelling and Experiments 6. *Elsevier*. 2005. 1012 p.

135. 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.

136. 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.

137. Monlau, F., Francavilla, M., Sambusiti, C., Antoniou, N., Solhy, A., Libutti, A., Zabaniotou, A., Barakat, A., Monteleone, M. Toward a functional integration of anaerobic digestion and pyrolysis for a sustainable resource management. Comparison between solid-digestate and its derived pyrochar as soil amendment. *Applied Energy*. 2016. v169, P. 652-662.

138. Haruo Kawamoto. Lignin pyrolysis reactions. *Journal of Wood Science*. 2017. v. 63, 2, P. 117–132.

139. Maksimov M., Davydov V., Krusir G., Maksimova O. Increasing of process efficiency of biogas plants production processing. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2017. Iss. 3. P. 43–53.

140. Глушко В.П. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справ. АН СССР, ВИНТИ / В.П. Глушко/ 1972. Т. 1. – 266 с.: ил.

141. Максимов М.В., Брунеткин А.И., Бондаренко А.В. Модель и метод определения условной формулы углеводородного топлива при сжигании. *Вост.-европ. журн. передовых технологий*. 2013. Т. 6. № 8 (66). С. 20–27.

142. Пальгунов П.П., Сумароков М.В. Утилизация промышленных отходов. М.: Стройиздат. 2011. 352 с.

143. Семенов В.Н. Современный комплекс для переработки бытовых и промышленных отходов. *Технология машиностроения*, 2015. № 1.

144. Управління та поводження з відходами. Частина 2. Тверді побутові відходи: навчальний посібник. / Петрук В. Г. та ін. Вінниця : ВНТУ, 2013. – 243 с.

145. Паулынтайнер Р., Граф М., Штубенволь И. Австрийская система очистки дымовых газов. *Твердые бытовые отходы*. — 2007.- № 4.- С. 59-63.

146. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on incineration of waste. *Official Journal of European Communities*. 28.12.2000. P. 332/91-332/111.

147. Тугов А.Н., Дик Э.П., Соболева А.Н. Оценка влияния минеральной части отходов на экологические характеристики образующихся при сжигании дымовых газов. *Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы: сб. докл. 5-ой науч.-практ. конф., т. 1*. Челябинск, 2011. С. 78-86.

148. Тугов А.Н., Дик Э.П., Соболева А.Н. Оценка влияния минеральной части отходов на содержание в дымовых газах газообразных соединений серы, хлора и фтора. *Электрические станции*. 2011. № 10. С. 15-20.

149. Угначев В.И., Епихин А.Н., Тугов А.Н. Контроль работы газоочистного оборудования на установках для сжигания твердых бытовых отходов. *Теплоэнергетика*. 2001. № 12. С. 52-56.

150. Сидорчук О.В. Розробка комплексної технології отримання біогазу із багатокomпонентних субстратів: дис. канд. техн. Наук: 03.0020. К. 2013. 166 с.

151. Brunetkin, A. I., Maksimov, M. V. (2015). The method for determination of a combustible gas composition during its combustion. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. Vol 5. P. 83–90.

152. Форсайт Дж., Молер К. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений (пер. с англ.). М.:Мир, 1969. 168с.

153. Жулин С.С. Метод продолжения по параметру и его приложение к задачам оптимального управления. *Вычислительные методы и программирование*. Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. Ломоносова. 2007. Т. 8. С. 205-217.

154. Maksymov M.V., Brunetkin O. I., Maksymova O. B. Application of a Special Method of Nondimensionization in the Solution of Nonlinear Dynamics

Problems. *Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics.*/ River Publishers, Alsbjergvej 10, 9260 Gistrup, Denmark. 2018. Chapter 5. P. 97-144.

155. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник : [в 6-ти т.]. / под науч. ред. акад. В.П. Глушко. М.: ВИНТИ, 1973. Том 3: Топлива на основе кислорода и воздуха. 624 с.

ДОДАТОК А
Документи про впровадження



Юр. адреса: 65039, м. Одеса, вул. Канатна, буд.130 А, кв.70
 П/р 26006455011123, Банк АТ "ОТП Банк" м. Київ, МФО 300528
 Код ЄДРПОУ: 26567715
 ПН: 265677115535
 Телефон: 0482-34-31-17

№ 8 від 26.03.2021 р.

Ректору ДУ «Одеська Політехніка»
 проф. Оборському Г.О.

ТОВ «Аграрний інститут» впроваджує в проектування утилізаційних установок результати дисертаційної роботи phd-здобувача кафедри Комп'ютерні технології автоматизації Бутенка Олександра Валерійовича на тему «Автоматизована система керування установкою піролізу на основі ідентифікації складу твердих побутових відходів». Отримані результати роботи, а саме автоматизована схема утилізації відходів рослинного походження, показала можливість отримання додаткового ресурсу для використання продукт-газу і вуглистого залишку. Показано, що вуглистий залишок має теплоту утворення $Q_{рн}=30$ МДж/кг, вихід якого може досягати 35 % від маси відходів рослинного походження при переробці. Продукт-газ має здатність утворювати теплоту $Q_{рн}=22$ МДж/н м³, а при частковій газифікації низькокалорійний газ має теплоту утворення $Q_{рн}=8$ МДж/н м³.

Розроблена в дисертаційній роботі система автоматичного регулювання установки піролізу прийнята за основу при проектуванні реального обладнання утилізації відходів рослинного походження потужністю 10 тонн на годину.

Директор



Дацюк Т.А.



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "УКРАГРО"

Юр. адреса: 65003, м. Одеса, вул. Чорноморського козацтва, буд.115
Р/р 26007001302348 в АТ "ОТП БАНК" МФО 300528
Код ЄДРПОУ: 32904793
ПІН: 329047915541
Телефон: 067-481-71-30

№ 19 від 15.03.2021 р.

Ректору Державного університету
«Одеська Політехніка»
проф. Оборському Г.О.

ТОВ «Украгро» впроваджує розроблені матеріали дисертаційного дослідження аспіранта кафедри Комп'ютерні технології автоматизації Бутенка Олександра Валерійовича в виробничий процес, а саме технологічну схему очищення продукт-газу отриману в результаті піролізу відходів агротехнологічного виробництва. Для очищення газоподібних продуктів згоряння пропонується застосувати систему газоочистки, в основі якої лежить сухий лужний метод.

Запропонована в роботі схема дозволяє оцінити розподіл сполук по тракту піролізної установки. Схема системи газоочистки, включає в себе абсорбер, в який для уловлювання кислих газів подається розпилений реагент сорбент у вигляді сухого лужного порошку сорбенту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або Na_2CO_3 , в рукавний фільтр.

Директор



Усатенко Т.Д.



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ODESSA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY

пр-т Шевченка, 1, м. Одеса-44, 65044 Україна
тел.: +38 048 7223474, факс: +38 048 7221992Shevchenko ave., 1, Odessa-44, 65044 Ukraine
phone: +38 048 7223474, fax: +38 048 7221992

E-mail: opu@opu.ua http://www.opu.ua, Код ЄДРПОУ 43861328

11.05.2021 № 932/05-06
На №

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
Бутенка Олександра Валерійовича,
представленої на здобуття наукового ступеня
доктора філософії за спеціальністю
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Бутенка О.В. «Автоматизована система керування установкою піролізу на основі ідентифікації складу твердих побутових відходів» Державним університетом «Одеська політехніка» використовуються при викладанні дисциплін кафедрою Комп'ютерних технологій автоматизації:

- Моделювання теплоенергетичного обладнання в АСУ;
- Динаміка теплових процесів;
- Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів;
- Структурна та параметрична оптимізація.

Довідка надана в зв'язку з захистом дисертації.

Проректор з науково-педагогічної
та виховної роботи



С.А. Нестеренко

Вик. Бєзлов К.В.
Тел. 705-83-71

ДОДАТОК Б
Список публікаційздобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертаційного дослідження :

1. Brunetkin O., Davydov V., Butenko O., Lysiuk G., Bondarenko A. Determining the composition of burned gas using the method of constraints as a problem of model interpretation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3/6 (99). P. 22–30. (SCOPUS).

2. Maksymov M. V., Brunetkin O. I., Beglov K.V., Alyokhina S.V., Butenko O.V. Automatic Control for the Slow Pyrolysis of Organic Materials with Variable Composition. *Advanced Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics River Publishers*. 2021. Chapter 14. P. 397-430. ISBN:978-87-7022-341-6 (Hardback), ISBN:978-87-7022-340-9 (Ebook) (SCOPUS)

3. Бутенко О.В., Максимов М.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І. Метод пошуку розв’язання складної задачі інтерпретації для розв’язання зворотної задачі з визначення складу пального. *Суднові енергетичні установки*. Науково-технічний збірник. Одеса. №39. 2019. С. (30–42)

4. Максимов М. В., Демиденко В. Е., Бутенко О. В., Брунеткін О. І. Модель піролізу органічних речовин змінного складу. *Інтегровані технології та енергозбереження*. №3. 2020. С. (12-24), DOI: 10.20998/2078-5364.2020.3.02

5. Максимов М. В., Демиденко В. Е., Бутенко О. В., Брунеткін О. І. Визначення складу палива для збройних сил України методом бібліотеки. *Збірник наукових праць НДЦ ЗСУ «Державний океанаріум» Інституту ВМС НУ «Одеська морська академія»*. №1(3). 2020 С. 102-110

6. Бутенко О.В., Ларіонова О.С. Імітаційна модель твердих побутових відходів як об’єкта керування. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія Технічні науки. том 32 (71), № 2. 2021. С. 92-105.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. Бутенко А.В., Демиденко В.Е., Максимов М.М., Максимова О.Б. Разработка метода определения целевой функции оптимизации энергетической

установки. *Modern scientific challenges and trends: a collection scientific works of the International scientific conference.*, Warsaw, Poland, 20th October, 2018. Warsaw. 2018. Issue. 9. P.128-133.

2. Butenko A.V., Demidenko V.E., Maksymova O.B. Development of the control system data ware and software for a heat supply variable structure system. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine: a collection scientific works of the International scientific and practical conference.*, Wloclawek, Republic of Poland, December 21-22, 2018. / Wloclawek. 2018. P.67 – 71.

3. Бутенко А.В., Демиденко Э.В., Брунеткин А.И. Метод идентификации состава газообразного горючего. *Сучасні тенденції розвитку науки: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції*, 17–18 березня 2018 р. (частина II). Київ. МНЦД. С. 39-40,

4. Бутенко О.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І Метод ідентифікації складу газоподібного пального. *Перспективні напрямки наукової думки: матеріали міжнародної науковопрактичної конференції*, 18 квітня 2018 р. Том 5. Тернопіль. ГО «Європейська наукова платформа» С. 63-69.

5. Бутенко О.В., Демиденко В.Е., Бондаренко В.В., Брунеткін О.І Модель і метод визначення витрати продуктів згорання газів природного і штучного походження. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (БОТТП_18_2018): матеріали XVIII міжнародної науковотехнічної конференції* 8–13 червня 2018 р. Одеса (Затока). С. 56-59.

6. Бутенко А.В., Демиденко В.Э., Брунеткін О.І. Разработка метода моделирования технических систем. *Science: discoveries and progress: Proceedings of articles the III International scientific conference.* Czech Republic. Karlovy Vary . 2018, April, 28-29 / Editors prof. A.B. Belinskaya.