

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 брутто-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 бруutto-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 зворотньо 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 зворотньої 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 burn edegaussing 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., 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. 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 of 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 soft ware for a heat supply variable structures system. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine: a collection of 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 науково-практичної 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 науково-технічної 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 modelling of structure of SHW on qualitative composition of elements is developed and the simulation modelling 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 republished

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.