

АНОТАЦІЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Brunetkin O., Beglov K., **Brunetkin V.**, Maksymov O., Maksymova O., Havaliukh O., Demydenko V. Construction of a method for representing an approximation model of an object as a set of linear differential models // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. 6/2 (108), 66–73. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.220326> (SCOPUS)
2. Brunetkin O., Maksymov M., **Brunetkin V.**, Maksymov O., Dobrynin Y., Kuzmenko V., Gultsov P. Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 4/1 (112), 41–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239150> (SCOPUS)
3. **Брунеткін В.О.**, Давидов В.О., Тарахтій О.С. Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин з використанням рівноважної моделі // [Вісник Херсонського національного технічного університету](#) / інженерні науки. 2023. 2(85), 9–19. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.1>
4. **Брунеткін В.О.**, Давидов В.О., Тельпіс Р.Ф., Жанько К.О. Метод мінімізації втрати з димовими газами шляхом управління їх кількістю при змінному навантаженні котла. // Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35 (74), №1, 111–117. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/17>
5. Davydov V., **Brunetkin V.**, Lysiuk G. Solution of the Inverse Incorrectly Posed Problem by the Library Method. // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. Volume 12, Issue 1, pp. 97-103. DOI: [10.25673/115647](https://doi.org/10.25673/115647); PPN [1884680704](https://doi.org/10.25673/115647) (ISSN 2199-8876) (SCOPUS)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

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

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

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

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

8. Брунеткін О. І., **Брунеткін В. О.** Визначення складу продуктів реакції термічної переробки органічних речовин довільного невідомого складу // IX Наукова конференція «НАУКОВІ ПІДСУМКИ 2020 РОКУ». Збірка наукових праць. – Харків, Х.: Технологічний Центр, 2020. – 70 с.

<https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/8214/1/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%81%D1%83%D0%BC%D0%BA%D0%B8%202020.pdf>

ABSTRACT

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

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

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

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

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

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

5. Davydov V., **Brunetkin V.**, Lysiuk G. Solution of the Inverse Incorrectly Posed Problem by the Library Method. // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. Volume 12, Issue 1, pp. 97-103. DOI:10.25673/115647; PPN [1884680704](https://ppn.ub.uni-erlangen.de/urn:nbn:de:hbz:5:1-88468-p0070-4) (ISSN 2199-8876) (SCOPUS)

Published works of approbation nature:

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

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

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