

АНОТАЦІЯ

Марколенко Т.Д. Модель і метод регулювання теплової потужності котла при зміні теплотворної здатності вуглеводного палива для підвищення ефективності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-технічної проблеми підвищення енергоефективності та екологічної безпеки процесу спалювання суміші вуглеводневих палив змінного складу в парових котлах. Для досягнення цієї мети в роботі запропоновано удосконалення математичної моделі керування тепловою потужністю з урахуванням змінної теплотворної здатності палива. Розроблено адаптивний метод регулювання об'єму та температури димових газів із автоматичним керуванням складом паливної суміші відповідно до поточного теплового навантаження. Застосування розробленого підходу забезпечує стабільність температурного режиму, підвищення коефіцієнта корисної дії котла та зменшення питомих викидів CO_2 без необхідності модернізації обладнання, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку енергетики. Обґрунтовано доцільність технічних рішень на основі чисельного моделювання, яке підтвердило їх енергоефективність, стійкість процесу горіння та зниження негативного впливу на довкілля. Запропоновані підходи базуються на чітко визначених показниках якості спалювання та критеріях ефективності автоматизованого регулювання, що дозволяє здійснити об'єктивну оцінку рівня оптимізації котельного обладнання за умов змінного паливного складу.

В першому розділі «Аналіз сучасного стану автоматизованих систем керування котлами зі змінним складом вуглеводневого палива» зроблено наступне:

- Проведено огляд сучасних видів палив, їх класифікацію, а також розглянуто фізико-хімічні властивості природних та штучних горючих газів;

- Проаналізовано особливості застосування паливних сумішей змінного складу, які ускладнюють дотримання нормативів продуктів згоряння, що зумовлює потребу в удосконаленні систем автоматизованого керування (САК) для забезпечення стабільності процесу спалювання за умов випадкової зміни теплотворної здатності палива.

- Досліджено існуючі автоматичні системи управління в умовах змінного складу палива та проаналізовано сучасні методи мінімізації викидів димових газів, зокрема в контексті переходу на альтернативні джерела енергії. Встановлено обмеження енергоефективності керування при низьких навантаженнях котла.

- Обґрунтовано науково-практичну необхідність створення нової математичної моделі, яка дозволяє підтримувати постійний об'єм продуктів згоряння при зміні теплотворної здатності паливної суміші.

- Сформульовано завдання дослідження, яке полягає в розробці методу регулювання теплової потужності котла зі збереженням сталої витрати димових газів і мінімізацією їх викидів задля підвищення екологічної безпеки.

У другому розділі «Модель об'єкта керування теплової потужності котла при зміні теплотворної здатності вуглеводного палива» отримано такі результати:

- Розроблено динамічну математичну модель котла, як об'єкта керування, яка враховує зміну теплотворної здатності палива і забезпечує стабілізацію витрати димових газів. Модель описує теплообміну в конвективних поверхнях нагріву та реалізує збіжний ітераційний процес визначення енергетичного балансу між складом газоподібного палива та необхідними параметрами теплоносія за фіксованої витрати димових газів. Ця витрата відповідає умовам згоряння сертифікованого вуглеводневого палива за номінального навантаження котла.

- Побудовано імітаційну модель процесу згоряння паливної суміші з урахуванням хімічної рівноваги продуктів згоряння, що базується на брутто-формулі суміші. Модель достовірно відтворює процеси утворення димових газів в умовах змінного складу суміші.

- Проведено верифікацію створеної моделі для типових палив: метано-повітряної суміші, деревини сосни та біогазу. Отримані результати порівняно з експериментальними та довідковими даними, що підтвердило достовірність моделі та її практичну придатність для подальшого використання.

- Застосування розробленої моделі дозволило здійснити дослідження режимів роботи котла за різного співвідношення компонентів паливної суміші (природний газ, доменний газ та біогаз). Установлено, що зміна складу пального впливає не лише на об'єм димових газів, а й на адіабатичну температуру горіння та теплові втрати, що є критично важливим для забезпечення термічної ефективності котла.

В третьому розділі «Метод керування об'ємом та температурою димових газів при змінному навантаженні парового котла» виконано наступне:

- Запропоновано метод регулювання теплової потужності парового котла шляхом зміни складу паливної суміші, зокрема співвідношення метану та низькокалорійного газу, за умови сталої об'ємної витрати палива. Такий підхід забезпечує постійну теплогідравлічну ситуацію у котлі, дозволяючи підтримувати сталий температурний режим і високий коефіцієнт корисної дії (ККД) навіть за умов змінного теплового навантаження.

- Розроблено модель розрахунку теплотворної здатності паливної суміші та параметрів димових газів, що дає змогу контролювати об'єм і температуру продуктів згоряння, а також знижувати теплові втрати. Показано, що при сталій об'ємній витраті паливної суміші потужність зменшується зі зростанням частки низькокалорійного газу, а параметри димових газів залишаються незмінними. Натомість за умов сталої витрати димових газів потужність зростає, що потребує технічного доопрацювання обладнання.

– Запропонована технологія дає змогу використовувати котельне обладнання без його модернізації для спалювання змішаного палива з меншою питомою часткою парникового CO_2 . Це створює передумови для адаптації енергетичних систем до умов паливної невизначеності та залучення альтернативних або несертифікованих видів палива.

В четвертому розділі «Спосіб автоматизованого регулювання теплової потужності котла за теплотворною здатністю палива з урахуванням критеріїв ефективності та впливу на довкілля» досягнуто мети дисертаційної роботи, а саме:

– Обґрунтовано, розроблено та досліджено новий спосіб регулювання теплової потужності котла з урахуванням теплотворної здатності вуглеводневого палива в умовах змінного навантаження та варіативного складу палива.

– Запропоновано новий підхід до стабілізації витрати димових газів, що базується на динамічному формуванні складу паливної суміші з адаптивним співвідношенням сертифікованого та несертифікованого газу.

– Розроблено структуру багаторівневої автоматизованої системи керування з каскадною координацією регуляторів, яка включає модулі онлайн-визначення теплотворної здатності, вимірювання температурних і динамічних характеристик продуктів згоряння, а також засоби підтримання оптимального складу паливної суміші.

– Результати чисельного моделювання підтвердили ефективність запропонованого способу в широкому діапазоні навантажень (від 40 до 100 %), забезпечуючи стабільну теплову потужність та сталу витрату димових газів навіть за умов зміни якості палива.

Ключові слова: суміш палив, енергоефективність, теплотворна здатність палива, спалювання, температура димових газів, об'єм димових газів, регулювання потужності, автоматична система управління, класифікація, система керування, математична модель, показники якості, критерій ефективності, екологічна безпека, довкілля.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Beglov, K., Kozlov, O., Kondratenko, Y., Markolenko, T., & Krivda, V. (2023). Automatic control of the boiler heat power based on changing hydrocarbon fuel's calorific value. *Problems of Control and Informatics*, 68(2), 75–92. DOI: <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2023-2-6> (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «А»)

2. Kryvda, V., Brunetkin, O., Beglov, K., Markolenko, T., & Lutsenko, I. (2024). Method of controlling the volume of combustion products at different boiler loads. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 100–104. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/100> (SCOPUS)

3. Markolenko T., Prodanov D. (2024). Model of greenhouse gas emission minimization under variable load of a steam boiler. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2024; Том 14, № 14: 284 – 295. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v14.no4.284>

4. Марколенко, Т. Д., Проданов, Д. Г., Беглов, Я. І. (2025). Управління тепловим навантаженням котла при спалюванні твердих побутових відходів. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 42(118), 43–51. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.42.118.2025.5>

5. Бакшанська, Т. Д.*, Рижиков, Ю. Г., & Тодорцев, Ю. К. (2007). Математична модель процесу горіння природного газу з рециркуляцією продуктів згорання для цілей управління. *Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы*, (2), 44–51. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aaeks_2007_2_9

6. Бакшанська, Т. Д.*, Рижиков, Ю. Г., & Тодорцев, Ю. К. (2008). Мінімізація токсичності продуктів згорання та втрат теплоти у топкових пристроях з рециркуляцією продуктів згорання на основі узагальненого критерію оптимізації. *Автоматика, автоматизация, электротехнические*

КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ, (1), 143–149. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aaeks_2008_1_24

7. Спосіб регулювання теплової потужності котла за теплотворною здатністю газу під час роботи котла на потужності, відмінній від номінальної: пат. України № 127803; заявл. 17.01.2022; опубл. 03.01.2024. Бюл. №1.

* (У поданих публікаціях авторка опублікована під прізвищем Бакшанська Т.Д., яке згодом було змінено на Марколенко Т.Д.).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Markolenko, T., & Tingayev, Ye. (2025). Automated boiler control system through regulation of the calorific value of variable-composition fuel. International Scientific Unity Conference Proceedings, Athens, Greece, 56–60. DOI: <https://doi.org/10.70286/ISU-26.02.2025> URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2025/02/Athens_Greece_26.02.25.pdf

9. Markolenko T., & Tingayev, Ye. (2025). Improvement of the mathematical model of gaseous fuel combustion in a boiler considering the variable composition of the fuel mixture and its impact on the thermal regime. International Scientific Unity Conference Proceedings, Bucharest, Romania, 248–254. DOI: <https://doi.org/10.70286/ISU-12.03.2025> URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2025/03/Bucharest_Romania_12.03.25.pdf

10. Markolenko T., & Tingayev, Ye. (2025). Synthesis of boiler heat output based on the calorific value of hydrocarbon fuel. Current Trends in Scientific Research Development, Boston, USA, 158–165. URL: <https://sci-conf.com.ua/viii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-current-trends-in-scientific-research-development-13-15-03-2025-boston-ssha-arhiv/>.

11. Markolenko T., Tingayev Ye. (2025). Method for reducing greenhouse gas emissions in steam boilers under variable load. Scientific research: modern challenges and future prospects, Munich, Germany, 151–156. URL: <https://sci-conf.com.ua/viii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-research-modern-challenges-and-future-prospects-munich-germany-13-15-03-2025-munich-germany-arhiv/>.

research-modern-challenges-and-future-prospects-17-19-03-2025-myunhen-nimechchina-arhiv/.

12. Markolenko, T., & Tingayev, Ye. (2025). Optimization of the combustion process in gas boilers by regulating the volume of flue gases using alternative fuels. International Scientific Unity Conference Proceedings, Sofia, Bulgaria, 343–348. DOI: <https://doi.org/10.70286/ISU-19.03.2025> URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2025/03/Sofia_Bulgaria_19.03.25.pdf

13. Марколенко, Т. Д. (2017). Нелінійна система автоматичного регулювання процесу спалювання газоподібного палива. У Матеріали 72-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (Ч. II, с. 35–37). Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова.

14. Марколенко, Т. Д., & Бабіч, В. Ф. (2016). Структурна схема системи управління, що реалізує вирішення задачі оптимізації процесу спалювання палива. У Матеріали 71-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (Ч. II, с. 140–142). Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова.

15. Трифонова, К. В., Бабіч, В. Ф., & Марколенко, Т. Д. (2016). Оптимізація процесу спалювання палива в парових котлах. У Матеріали 71-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (Ч. II, с. 163–165). Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова.

16. Бабіч, В. Ф., & Марколенко, Т. Д. (2015). Моделювання системи автоматичної оптимізації процесу спалювання палива змінного складу. У Матеріали 70-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (Ч. II, с. 97–100). Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова.

17. Марколенко, Т. Д. (2015). Система автоматичного регулювання спалювання природного газу в котлі з рециркуляцією димових газів. У Матеріали 70-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького

складу, науковців, аспірантів та студентів (Ч. II, с. 107–110). Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова.

18. Марколенко, Т. Д. (2014). Математична модель процесу спалювання природного газу. У Матеріали 69-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (Ч. III, с. 149–151). Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова.

19. Марколенко, Т. Д. (2014). Оптимізація процесу спалювання палива з використанням визначених критеріїв. У I Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (16–17 квітня 2014 р., с. 49–50). Київ.

20. Марколенко, Т. Д., & Тодорцев, Ю. К. (2013). Аналіз систем регулювання економічності процесу спалювання природного газу. У III Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (17–18 квітня 2013 р., с. 78–79). Київ.

ABSTRACT

Markolenko, T.D. Model and Method of Regulating the Thermal Power of a Boiler under Varying Calorific Value of Hydrocarbon Fuel to Improve Efficiency. – Qualification scientific work as a manuscript.

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

The dissertation addresses the pressing scientific and technical problem of increasing the energy efficiency and environmental safety of combustion processes involving mixtures of hydrocarbon fuels of variable composition in steam boilers. To achieve this goal, the study proposes an improved mathematical model for regulating boiler thermal power, taking into account the variable calorific value of the fuel. An adaptive method has been developed for controlling the volume and temperature of flue gases, with automatic regulation of the fuel mixture composition based on the current thermal load. The implementation of the proposed approach ensures thermal regime stability, increased boiler efficiency, and reduced specific CO₂ emissions without requiring equipment modernization, thus meeting the current standards of sustainable energy development. The feasibility of the technical solutions is substantiated through numerical modeling, which demonstrated high energy efficiency, combustion stability, and reduced environmental impact. The proposed approaches are based on clearly defined combustion quality indicators and efficiency criteria for automated thermal power control, enabling an objective assessment of boiler optimization under conditions of variable fuel composition.

Chapter 1, "Analysis of the current state of automated control systems for boilers operating on hydrocarbon fuels of variable composition", presents the following tasks that were completed:

- A review of current fuel types was conducted, along with their classification and analysis of the physicochemical properties of natural and synthetic gaseous fuels;

- The challenges of using variable-composition fuel mixtures were examined, which complicate compliance with emission standards and necessitate the improvement of automated control systems (ACS) to stabilize combustion under changing calorific values of fuel;

- Existing automatic control systems under variable fuel composition were analyzed, as well as modern methods for minimizing flue gas emissions, especially in the context of transitioning to alternative energy sources. Limitations in energy efficiency at low boiler loads were identified;

- The scientific and practical necessity for a new mathematical model was substantiated – one that enables maintaining a constant flue gas volume under varying fuel calorific values;

- The research objectives were formulated, focusing on the development of a method for regulating boiler thermal power while maintaining constant flue gas flow and minimizing emissions to enhance environmental safety.

Chapter 2, “Model of the controlled object for boiler thermal power under variable calorific value of hydrocarbon fuel” presents the following results:

- A dynamic mathematical model of the boiler as a control object was developed, which accounts for variations in the calorific value of the fuel and ensures the stabilization of the flue gas flow rate. The model describes heat transfer in the convective heating surfaces and implements a convergent iterative process for determining the energy balance between the composition of the gaseous fuel and the required parameters of the heat carrier, under the condition of constant flue gas flow. This flow rate corresponds to the combustion conditions of certified hydrocarbon fuel at nominal boiler load.

- A simulation model of the combustion process of the fuel mixture was constructed, taking into account the chemical equilibrium of the combustion products based on the gross formula of the mixture. The model reliably reproduces the processes of flue gas formation under variable fuel composition conditions.

- The developed model was verified using typical fuels: methane-air mixture, pine wood, and biogas. The obtained results were compared with experimental and

reference data, confirming the model's accuracy and its practical suitability for further application.

- The application of the developed model enabled the study of boiler operation modes under various ratios of fuel mixture components (natural gas, blast furnace gas, and biogas). It was found that changes in fuel composition affect not only the volume of flue gases but also the adiabatic combustion temperature and heat losses, which are critically important for ensuring the boiler's thermal efficiency.

Chapter 3, “Method for controlling the volume and temperature of flue gases under variable load conditions of a steam boiler,” provides the following results:

- A method for regulating the thermal power of a steam boiler was proposed by varying the composition of the fuel mixture – specifically, the ratio of methane to low-calorific gas – while maintaining a constant volumetric fuel flow rate. This approach ensures a stable thermohydraulic environment within the boiler, enabling consistent temperature conditions and a high thermal efficiency (efficiency factor), even under variable thermal loads.

- A model was developed to calculate the calorific value of the fuel mixture and the parameters of the flue gases, allowing for control of both the volume and temperature of combustion products, as well as a reduction in heat losses. It was shown that, under a constant volumetric fuel flow rate, the thermal power decreases as the share of low-calorific gas increases, while the flue gas parameters remain unchanged. Conversely, under constant flue gas flow conditions, the thermal power increases, which necessitates technical adjustments to the equipment.

- The proposed technology enables the use of boiler equipment without modernization for the combustion of mixed fuels with a lower specific share of greenhouse CO₂ emissions. This creates the prerequisites for adapting energy systems to fuel uncertainty and integrating alternative or uncertified types of fuel.

In Chapter 4, “Method for automated regulation of boiler thermal output based on the fuel's calorific value, considering efficiency criteria and environmental impact” the objective of the dissertation was achieved, namely:

- A new method for regulating the thermal power of the boiler was substantiated, developed, and investigated, taking into account the calorific value of hydrocarbon fuel under conditions of variable load and fluctuating fuel composition.

- A novel approach to stabilizing the flue gas flow rate was proposed, based on the dynamic formation of the fuel mixture composition with an adaptive ratio of certified and non-certified gases.

- The structure of a multi-level automated control system was developed, featuring cascade coordination of controllers. The system includes modules for real-time calorific value estimation, measurement of temperature and dynamic characteristics of combustion products, and tools for maintaining the optimal composition of the fuel mixture.

- Numerical simulation results confirmed the effectiveness of the proposed method across a wide load range (from 40% to 100%), ensuring stable thermal power output and constant flue gas flow rate even under conditions of varying fuel quality.

Keywords: fuel mixture, energy efficiency, fuel calorific value, combustion, flue gas temperature, flue gas volume, power control, automation, classification, control system, mathematical model, quality indicators, efficiency criterion, environmental safety, environment.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

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

1. Beglov, K., Kozlov, O., Kondratenko, Y., Markolenko, T., & Kryvda, V. (2023). Automatic control of the boiler heat power based on changing hydrocarbon fuel's calorific value. *Problems of Control and Informatics*, 68(2), 75–92. DOI: <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2023-2-6> (Ukrainian scientific journal, category "A").

2. Kryvda, V., Brunetkin, O., Beglov, K., Markolenko, T., & Lutsenko, I. (2024). Method of controlling the volume of combustion products at different boiler

loads. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 100–104. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/100> (SCOPUS).

3. Markolenko, T., & Prodanov, D. (2024). Model of greenhouse gas emission minimization under variable load of a steam boiler. *Informatics and Mathematical Methods in Modeling*, 14(4), 284–295. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v14.no4.284>

4. Markolenko, T. D., Prodanov, D. H., & Beglov, Y. I. (2025). Control of boiler thermal load during the combustion of solid municipal waste. *Electrotechnical and Computer Systems*, 42(118), 43–51. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.42.118.2025.5>

5. Bakshanska, T. D.*, Ryzhykov, Y. H., & Todortsev, Y. K. (2007). Mathematical model of natural gas combustion with flue gas recirculation for control purposes. *Automatics, Automation, Electrotechnical Complexes and Systems*, (2), 44–51. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aaeks_2007_2_9

6. Bakshanska, T. D.*, Ryzhykov, Y. H., & Todortsev, Y. K. (2008). Minimization of flue gas toxicity and heat losses in furnaces with flue gas recirculation based on a generalized optimization criterion. *Automatics, Automation, Electrotechnical Complexes and Systems*, (1), 143–149. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aaeks_2008_1_24

7. Method for controlling boiler thermal output based on the calorific value of gas during operation at non-nominal power: Patent of Ukraine for invention № 127803; statement 17.01.2022; published 03.01. 2024. Bulletin №. 1.

*– (In the presented publications, the author was listed under the surname Bakshanska T. D., which was later changed to Markolenko T. D.)

Publications of an approbatory nature:

8. Markolenko, T., & Tingayev, Ye. (2025). Automated boiler control system through regulation of the calorific value of variable-composition fuel. *International Scientific Unity Conference Proceedings, Athens, Greece*, 56–60. DOI:

<https://doi.org/10.70286/ISU-26.02.2025> URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2025/02/Athens_Greece_26.02.25.pdf

9. Markolenko, T., & Tingayev, Ye. (2025). Improvement of the mathematical model of gaseous fuel combustion in a boiler considering the variable composition of the fuel mixture and its impact on the thermal regime. International Scientific Unity Conference Proceedings, Bucharest, Romania, 248–254. DOI: <https://doi.org/10.70286/ISU-12.03.2025> URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2025/03/Bucharest_Romania_12.03.25.pdf

10. Markolenko, T., & Tingayev, Ye. (2025). Synthesis of boiler heat output based on the calorific value of hydrocarbon fuel. Current Trends in Scientific Research Development, Boston, USA, 158–165. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2025/03/CURRENT-TRENDS-IN-SCIENTIFIC-RESEARCH-DEVELOPMENT-13-15.03.25.pdf>

11. Markolenko, T., & Tingayev, Ye. (2025). Method for reducing greenhouse gas emissions in steam boilers under variable load. Scientific research: modern challenges and future prospects, Munich, Germany, 151–156. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2025/03/SCIENTIFIC-RESEARCH-MODERN-CHALLENGES-AND-FUTURE-PROSPECTS-17-19.03.25.pdf>

12. Markolenko, T., & Tingayev, Ye. (2025). Optimization of the combustion process in gas boilers by regulating the volume of flue gases using alternative fuels. International Scientific Unity Conference Proceedings, Sofia, Bulgaria, 343–348. DOI: <https://doi.org/10.70286/ISU-19.03.2025> URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2025/03/Sofia_Bulgaria_19.03.25.pdf

13. Markolenko, T. D. (2017). Nonlinear automatic control system for the combustion process of gaseous fuel. In Proceedings of the 72nd Scientific and Technical Conference of Faculty, Researchers, Postgraduates and Students (Part II, pp. 35–37). Odesa: O.S. Popov Odesa National Academy of Telecommunications.

14. Markolenko, T. D., & Babich, V. F. (2016). Structural diagram of a control system for optimizing the fuel combustion process. In Proceedings of the 71st Scientific and Technical Conference of Faculty, Researchers, Postgraduates and

Students (Part II, pp. 140–142). Odesa: O.S. Popov Odesa National Academy of Telecommunications.

15. Tryfonova, K. V., Babich, V. F., & Markolenko, T. D. (2016). Optimization of the fuel combustion process in steam boilers. In Proceedings of the 71st Scientific and Technical Conference of Faculty, Researchers, Postgraduates and Students (Part II, pp. 163–165). Odesa: O.S. Popov Odesa National Academy of Telecommunications.

16. Babich, V. F., & Markolenko, T. D. (2015). Modeling of an automatic optimization system for combustion of variable-composition fuel. In Materials of the 70th Scientific and Technical Conference of the Faculty and Students (Part II, pp. 88–91). Odesa: O.S. Popov Odesa National Academy of Telecommunications.

17. Markolenko, T. D. (2015). Automatic control system for natural gas combustion in a boiler with flue gas recirculation. In Materials of the 70th Scientific and Technical Conference of the Faculty and Students (Part II, pp. 98–100). Odesa: O.S. Popov Odesa National Academy of Telecommunications.

18. Markolenko, T. D. (2014). Mathematical model of the natural gas combustion process. In Materials of the 69th Scientific and Technical Conference of the Faculty and Students (Part III, pp. 143–145). Odesa: O.S. Popov Odesa National Academy of Telecommunications.

19. Markolenko, T. D. (2014). Optimization of the fuel combustion process using defined criteria. In Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students "Automation and Computer-Integrated Technologies" (April 16–17, pp. 49–50). Kyiv.

20. Markolenko, T. D., & Todortsev, Y. K. (2013). Analysis of control systems for economic efficiency of natural gas combustion. In Proceedings of the 3rd All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students "Automation and Computer-Integrated Technologies" (April 17–18, pp. 78–79). Kyiv.