

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Колбасенко Олег Васильович

УДК 621.036

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ, ЕКОЛОГІЧНОЇ
ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ РОБОТИ КОТЕЛЬНИХ
УСТАНОВОК АКТИВАЦІЄЮ ГОРІННЯ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ

Спеціальність 144 – Теплоенергетика
Галузь знань 14 – Електрична інженерія

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. Колбасенко

Науковий керівник:

Кошельнік Олександр Вадимович,
кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Колбасенко О.В. Підвищення техніко-економічної, екологічної ефективності та надійності роботи котельних установок активацією горіння водопаливних емульсій. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 144 – Теплоенергетика (14 – Електрична інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків, 2025.

Дисертаційна робота присвячена дослідженням процесів спалювання водопаливної емульсії на основі мазуту з метою удосконалення технології її використання в топкових камерах котельних установок.

Об'єктом дослідження є фізико-хімічні процеси, що відбуваються при спалюванні водопаливних емульсій в топкових камерах котельних установок.

Предметом дослідження є закономірності, що характеризують процес спалювання водопаливних емульсій та їх вплив на ефективність, екологічність та надійність роботи котельних установок.

Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування теоретичних положень і розробка практичних рішень щодо підвищення техніко-економічних, екологічних показників роботи та надійності експлуатації котельних установок при спалюванні водопаливних емульсій.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми роботи, що пов'язана з проблемою використання водопаливних емульсій для підвищення енергоекологічної ефективності та надійності експлуатації котельного обладнання. Аналізуючи сучасний стан проблеми, показано, що існуючі дослідження не враховують весь комплекс параметрів, що впливає на процеси спалювання водопаливної емульсії. Визначені мета та задачі дослідження, наведено дані про її наукову новизну, практичне значення, апробацію результатів та публікації за темою роботи.

У *першому розділі* представлений аналіз джерел інформації з питань

використання водопаливних емульсій в двигунах, газотурбінних та котельних установках. Проаналізовані фактори, що впливають на процес згоряння водопаливних емульсій в порівнянні з традиційними способами підвищення якості горіння – упорскуванням водяної пари або введенням води в зону горіння. Проаналізовано вплив якості води на ефективність роботи енергетичних установок та методи її підготовки, показано необхідність застосування додаткових заходів для активації робочих процесів, у тому числі кавітаційної обробки на стадії підготовки ВПЕ. Ззначається недостатня повнота інформації щодо визначення вимог до якості води для ВПЕ та параметрів робочих процесів при спалюванні емульсії за умов різного водовмісту.

У *другому розділі* розглянуто процеси вібраційного горіння та їх вплив на спалювання водопаливної емульсії. Розглянуто різні види вібраційного горіння та їх математичний опис. Визначені умови, за яких спостерігається позитивний вплив такого режиму горіння на інтенсифікацію теплообміну та зменшення шкідливих викидів у довкілля. Проаналізовані різні процеси перетворень водної фази ВПЕ, кожен з яких супроводжується різними закономірностями дроблення вихідних крапель палива.

Третій розділ присвячено дослідженням явища високо- та низькотемпературної корозії при спалюванні водопаливних емульсій. Представлено опис експериментальної установки та результати досліджень впливу мінеральної частини палива та води при спалюванні ВПЕ, температури поверхні металі та коефіцієнту надлишку повітря при різному солевмісті води для сталі 20 та 1Х18Н10Т. Проведено порівняльний аналіз витрат ВПЕ та мазуту, отримано залежності швидкості високотемпературної та низькотемпературної корозії при різному солевмісті та коефіцієнті надлишку повітря. Шляхом обробки результатів експериментальних досліджень отримані регресійні рівняння, які дозволяють прогнозувати інтенсивність корозії при використанні ВПЕ та чистих палив, проведена оцінка погрешностей отриманих рівнянь.

У *четвертому розділі* запропоновані варіанти конструктивних рішень для

промислових та утилізаційних котлів з установкою конденсаційних поверхонь нагріву з різних матеріалів. Запропоновано використання скрубєрних технологій із застосуванням конденсаційних поверхонь із насадкою з некорозійних матеріалів. Для суднових котельних установок обґрунтовано використання електродіалізних технологій підготовки води, показана перевага їх використання. Розроблена схема технології комплексного використання паливно-енергетичних і водних ресурсів, особливістю якої є використання на етапах попередньої підготовки прісної води та палива кавітаційної обробки різної інтенсивності. Проведений аналіз впливу впорскування водяної пари на емісію шкідливих речовин при спалюванні ВПЕ у порівнянні з чистим паливом. За допомогою методів статистичної обробки даних отримано рівняння багатовимірної регресії, що дозволяє визначити швидкість приросту забруднюючих речовин для спалювання ВПЕ з вмістом сірки до 30 %.

У висновках наведено основні результати наукової роботи щодо вирішення поставлених наукових задач дослідження.

За результатами дослідження отримано такі наукові результати:

- на основі проведених експериментальних досліджень отримані нові апроксимаційні залежності для визначення інтенсивності високо- та низькотемпературної корозії при використанні водопаливних емульсій з різним співвідношенням паливо/вода та вмістом сірки в діапазоні коефіцієнтів надлишку повітря 1,01-1,5;

- вперше розроблено прикладне рішення щодо компонування котельних установок з використанням скрубєрів з підігрівом повітря і підсушкою газів та надані рекомендації щодо вибору матеріалів, які забезпечують надійну роботу обладнання при температурі стінок нижче 70 °C за умов використання водопаливних емульсій, теплоти конденсації водяної пари та пари сірчаної кислоти;

- вперше запропоновано технологію комплексного використання паливно-енергетичних і водних ресурсів з електродіалізною обробкою води для суднових котлів, особливістю якої є наявність кавітаційної обробки різного

рівня інтенсивності на всіх етапах попередньої підготовки води, палива або нафтомасловмісних вод перед змішуванням у кавітаторі;

– отримано нове рівняння для визначення швидкості забруднення поверхонь нагріву котлів та газоходів, що враховують вплив коефіцієнта надлишку повітря, вмісту сірки та води у водопаливній емульсії при наявності корозійних процесів для широкого діапазону зазначених параметрів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

– отримано шляхом обробки експериментальних даних рівняння для визначення інтенсивності високо- та низькотемпературної корозії дозволять здійснювати довгострокове прогнозування динаміки розвитку корозійних процесів при спалюванні водопаливних емульсій різного складу;

– надано рекомендації щодо можливого рівня температури стінок поверхней нагріву котлів для різних марок сталі з урахуванням вмісту сірки та солевмісту води для приготування емульсії;

– використання розроблених конструктивних рішень щодо компоновання котельних установок з використанням скрубера з підігрівом повітря і підсушкою газів дозволить забезпечити майже 100 % утилізацію теплоти конденсації пари сірчаної кислоти і водяної пари при надійній роботі конденсаційних поверхонь котлів і їх газоходів при температурі стінок менше 70 °C при спалюванні водопаливної емульсії;

– запропоновано технологію комплексного використання паливно-енергетичних і водних ресурсів з електродіалізною обробкою води для отримання ВПЕ, яка передбачає використання ділюату для кавітаційного приготування ВПЕ та католіту для зрошення скруберів з використанням теплоти конденсації пари H_2SO_4 і H_2O та забезпечує підвищення екологічних і техніко-економічних показників роботи енергетичних установок;

– отримане рівняння багатовимірної регресії дозволить прогнозувати інтенсивність забруднення поверхонь нагріву та газоходів котельних установок при спалюванні ВПЕ з урахуванням впливу комплексу параметрів – коефіцієнту надлишку повітря, вмісту сірки та вологовмісту емульсії у

широкому діапазоні, що відповідає реальним режимам роботи обладнання.

Підтверджено практичну та теоретичну цінність отриманих результатів дослідження, надано практичні рекомендації щодо їх застосування, розглянуто перспективи їх подальшого розвитку.

Ключові слова: котельні установки, водопаливна емульсія, горіння, активація, водовміст, термоакустичні процеси, економія палива, зменшення шкідливих викидів, корозія, забруднення поверхонь, ефективність, надійність.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Колбасенко О.В., Димо Б.В., Горячкін А.В., Корнієнко В.С. Результати досліджень низькотемпературної корозії при спалюванні водопаливних емульсій. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : «Технічні науки»*. Маріуполь: ПДТУ, 2018. № 37. С. 44-52. (Б)

2. Філіпчук О.М., Колбасенко О.В. Теплові і шкідливі викиди димових газів при спалюванні водопаливних емульсій. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. Миколаїв: НУК, 2019. № 3 (477). С. 10-17. (Б)

3. Колбасенко О.В. Вплив способів вводу води в полум'я на ефективність горіння і викиди оксидів азоту. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : «Технічні науки»*. Маріуполь: ПДТУ, 2020. № 40. С. 150-158. (Б)

4. Філіпчук О.М., Колбасенко О.В. Підвищення техніко-економічної ефективності суднових котельних установок при спалюванні водопаливних емульсій. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. Миколаїв: НУК, 2020. № 1 (479). С. 51-60. (Б)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

5. Горячкін В. Ю., Горячкін А. В., Колбасенко О. В. Переваги спалювання кавітаційних водопаливних емульсій. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика* : Тези доповідей III Всеукр. науково-практ. конф. молодих вчених, фахівців, аспірантів, м. Маріуполь, 11-12 травня 2017 р. Маріуполь: Приазовський державний технічний університет, 2017. – С. 102-103.

6. Горячкін А. В., Колбасенко О. В. Доцільність і переваги використання скрубєрних технологій. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика* : Тези доповідей III Всеукр. науково-практ. конф. молодих вчених, фахівців, аспірантів, м. Маріуполь, 11–12 травня 2017 р. Маріуполь: Приазовський державний технічний університет, 2017. – С. 104-105.

7. Колбасенко О. В., Горячкін А. В., Дем'яненко В. С. Ефективність спалювання водопаливних емульсій в ДВЗ. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування* : Матеріали V Міжнар. науково-техн. конф. присвяченої 160-річчю з дня народження Рудольфа Дизеля, м. Миколаїв, 21–22 листопада 2018 р. Миколаїв : Видавець Торубара В.В., 2018. – С. 80-82.

8. Димо Б.В., Колбасенко О.В., Горячкін А.В., Язловецький А.В. Підвищення екологічних, техніко-економічних показників та надійності роботи елементів СЕУ при спалюванні водопаливних емульсій. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування* : Матеріали X-ї Міжнар. науково-практ. конф., м. Херсон, 12–13 вересня 2019 р. Херсон : Херсонська державна морська академія, 2019. – С. 110-112.

9. Kolbasenko O., Kundenko M., Vakhonina L., Rudenko A., Mardziavko V. Improving the reliability of elements of energy installations when combustion of different quality fuel. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (м. Кременчук, 27-30 вересня 2023 р.). Kremenchuk, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2023. – P. 1-6 (Scopus).

10. Kolbasenko O., Kundenko M., Sadovoy O., Rudenko A., Mardziavko V. Research of the vibration mode of combustion of water-fuel emulsion for improving

the efficiency indicators of the power plant. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (м. Кременчук, 27-30 вересня 2023 р.). Kremenchuk, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2023. – Р. 1-7 (Scopus).

11. Колбасенко О.В., Димо Б.В., Анастасенко С.М., Стельмах О.І. Підвищення ефективності спалювання водопаливних емульсій в ДВЗ. *Суднова енергетика: стан та проблеми* : Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Миколаїв, 07-08 листопада 2023 р. Миколаїв : Видавець Торубара В.В., 2023. – С.181-188.

12. Kolbasenko O., Dymo B., Anastasenko S., Stelmakh O. Increasing the efficiency of combustion of water fuel emulsions in internal combustion engines. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування* : Матеріали 15-ої Міжнар. наук.-практ. конф., м. Херсон, 13-15 березня 2024 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2024. – С.42-45.

13. Kolbasenko O., Dymo B. Efficiency of water input into the flame on combustion quality and nitrogen oxide emissions. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : Матеріали XV Міжнар. наук.-техн. конф., м. Миколаїв, 26–27 вересня 2024 р. Миколаїв : НУК, 2024. – С.172-175.

ABSTRACT

Kolbasenko O.V. Improving the technical, economic, environmental efficiency and reliability of boiler installations by means of activating the combustion of water-fuel emulsions. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 144 – Thermal power engineering (14 – Electrical engineering). – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2025.

The results of research into the combustion of water-fuel emulsion are presented in the dissertation, as well as practical recommendations for improving the technology of its use in combustion chambers of boiler installations that have been developed.

The object of the study is the physicochemical processes that occur during the combustion of water-fuel emulsions in the combustion chambers of boiler installations.

The subject of the study is the patterns that characterize the process of burning water-fuel emulsions and their influence on the efficiency, environmental friendliness and reliability of the operation of boiler installations.

The objective of the dissertation is scientific development of the theoretical basis and practical solutions to improve the technical, economic, environmental performance and reliability of boiler installations when using water-fuel emulsions.

The *introduction* demonstrates the relevance of the topic of the dissertation, defines the research objectives, provides data on its scientific originality, practical significance, testing of the results, and publications made on the topic of the work.

The first chapter presents an analysis of sources of information on the use of water-fuel emulsions in engines, gas turbines, and boiler installations. Factors affecting the combustion process of water-fuel emulsions are analyzed in comparison with traditional methods of improving the quality of combustion, such as injecting steam or introducing water into the combustion zone. The influence of water quality on the efficiency of power generating installations and methods of its preparation are

analyzed, and the need for additional measures to activate work processes, including cavitation processing at the stage of preparation of the water-fuel emulsions, is shown. The lack of complete information on determining water quality requirements for water-fuel emulsions and work processes parameters when burning emulsion under conditions of different water content is pointed out.

In *the second chapter*, the processes of vibrational combustion and their influence on the combustion of water-fuel emulsion are examined. Different types of vibrational combustion and their mathematical description are considered. The conditions under which a positive effect of such combustion mode on the intensification of heat transfer and the reduction of harmful emissions into the environment is observed are determined. Various processes of transformation of the water phase of the water-fuel emulsions are analyzed, each of which is accompanied by different patterns of fragmentation of the initial fuel droplets.

The third chapter is devoted to the study of the phenomenon of high- and low-temperature corrosion during the combustion of water-fuel emulsions. A description of the experimental setup and the results of studies of the influence of the mineral part of the fuel and water during the combustion of water-fuel emulsions, as well as of the metal surface temperature and the excess air coefficient at different water salinity for steel 20 and 1X18N10T, are presented. A comparative analysis of the consumption of water-fuel emulsions and heavy fuel oil was conducted, and the dependences of the rate of high-temperature and low-temperature corrosion at different salt content and excess air coefficient were obtained. On the basis of processing the results of experimental studies, regression equations were obtained that allow predicting the intensity of corrosion when using water-fuel emulsions and pure fuels, and an assessment of the errors of the obtained equations was carried out.

In *the fourth chapter* design solutions for industrial and waste-to-energy boilers equipped with the condensing heating surfaces made of various materials are proposed. The use of scrubber technologies that envision condensation surfaces with a nozzle made of non-corrosive materials is proposed. For ship boiler installations, the use of electrodialysis technologies for water preparation is substantiated, and the

advantage of their use is shown. A scheme of the technology for the integrated use of fuel, energy and water resources has been developed, the feature of which is the use of cavitation processing of various levels of intensity at all stages of preliminary preparation of fresh water and fuel. An analysis of the influence of water vapor injection on the emission of harmful substances during the combustion of water-fuel emulsions in comparison with pure fuel was carried out. Using statistical data processing methods, multivariate regression equations were obtained, which allows determining the rate of increase in pollutants for the combustion of water-fuel emulsions with a sulfur content of up to 30%.

In the conclusions, the main results of the scientific work regarding the solution of the scientific problems set in the research are presented.

The scientific originality of the conducted research is attested by the following outcomes achieved for the first time:

- based on the conducted experimental studies, new approximation equations were obtained for determining the intensity of high- and low-temperature corrosion when using water-fuel emulsions with different fuel to water ratios and sulfur content in the range of excess air coefficients 1,01-1,5;

- applied solutions for the layout of boiler installations that use scrubbers with air heating and gas drying are proposed and recommendations are given for the selection of materials that ensure reliable operation of the equipment at a wall temperature below 70 °C under the conditions of burning water-fuel emulsions and using steam and sulfuric acid vapor heat of condensation;

- a technology for the integrated use of fuel, energy and water resources with electrodialysis water preparation for ship boilers has been proposed, a feature of which is the presence of cavitation processing of various levels of intensity at all stages of preliminary preparation of water, fuel or waters containing petroleum oil before mixing in a cavitator;

- a new equation was obtained to determine the rate of contamination of heating surfaces of boilers and gas ducts, which takes into account the influence of the excess air coefficient, sulfur and water content in the water-fuel emulsion in the

presence of corrosion processes for a wide range of these parameters.

The practical significance of the results obtained is as follows:

- the equations for determining the intensity of high- and low-temperature corrosion obtained by means of processing experimental data make possible long-term forecasting of the dynamics of corrosion processes during the combustion of water-fuel emulsions of various compositions;
- recommendations are provided regarding the possible temperature level of the walls of the heating surfaces of boilers for different grades of steel, taking into account the salt and sulfur content of the water for preparing the emulsion;
- the use of the developed design solutions for the layout of boiler installation using a scrubber with air heating and gas drying make possible ensuring almost 100% utilization of the condensation heat of sulfuric acid vapor and water vapor with reliable operation of the condensing surfaces of boilers and their gas ducts at a wall temperature of less than 70 °C during a water-fuel emulsion combustion;
- the proposed technology for the integrated use of fuel, energy and water resources with electrodialysis water processing to obtain a water-fuel emulsion involves the use of dilute in the scheme for cavitation preparation of water-fuel emulsions and catholyte for scrubber bedewing, which makes possible using the heat of condensation of H_2SO_4 and H_2O vapors and ensures an increase in the environmental and economic indicators of power generating installations;
- the obtained multivariate regression equation makes possible predicting the intensity of contamination of boiler installation heating surfaces and gas ducts during the combustion of a water-fuel emulsion, taking into account the influence of the set of the parameters composed of excess air coefficient, sulfur content, and emulsion moisture content in a wide range that corresponds to real operating modes of the equipment.

The practical and theoretical value of the research results are confirmed, practical recommendations for their application are provided, and the prospects for their further development have been considered.

Keywords: boiler installations, water-fuel emulsion, combustion, activation, water content, thermoacoustic processes, fuel economy, reduction of harmful emissions, corrosion, surface contamination, efficiency, reliability.

List of the applicant's publications

Scientific works in which the main scientific results are published:

1. Kolbasenko O.V., Dymo B.V., Goryachkin A.V., Kornienko V.S. Results of studies of low-temperature corrosion during the combustion of water-fuel emulsions. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University (Section: Technical sciences)*. Mariupol : PSTU, 2018. № 37. P. 44-52. (B)
2. Filipshchuk O.M., Kolbasenko O.V. Heat and harmful emissions from gases burning of water-fuel emulsions. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*. Mykolaiv : National University of Shipbuilding, 2019. № 3 (477). C. 10-17. (B)
3. Kolbasenko O.V. Influence of methods of introducing water into the flame on combustion efficiency and nitrogen oxide emissions. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*. Mariupol : PSTU, 2020. № 40. P. 150-158. (B)
4. Filipshchuk O.M., Kolbasenko O.V. Improvement of technical and economic efficiency of ship boiler units for combustion of waterfuel emulsions. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*. Mykolaiv: National University of Shipbuilding, 2020. № 1 (479). P. 51-60. (B)

Proceeding and materials of conferences (Approbation):

5. Goryachkin V.Y, Goryachkin A.V., Kolbasenko O.V. Advantages of cavitation processed water-fuel emulsion combustion. *Problems of energy saving in the industrial region. Science and practice* : III All-Ukrainian scientific and practical conference of young scientists, specialists, postgraduate students, Mariupol, May

11-12, 2017 : theses of reports. Mariupol: PSTU, 2017. – P. 102-103.

6. Goryachkin A.V., Kolbasenko O.V. The feasibility and benefits of using scrubber technologies. *Problems of energy saving in the industrial region. Science and practice* : III All-Ukrainian scientific and practical conference of young scientists, specialists, postgraduate students, Mariupol, May 11-12, 2017 : theses of reports. Mariupol: PSTU, 2017. – P. 104-105.

7. Kolbasenko O.V., Goryachkin A.V., Demyanenko V.S. Efficiency of combustion of water-fuel emulsions in ICE. *Problems of the Modern Engine Manufacturing : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Mykolaiv : Publisher Torubara V.V., 2018. – P. 80-82.

8. Dymo B.V., Kolbasenko O.V., Goryachkin A.V., Yazlovetsky A.V. Improvement of environmental, technical and economic indicators and reliability of SEI elements during combustion of water-fuel emulsions. Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference. *Modern installations generating installations in transport, technologies and equipment for their maintenance*, Kherson, September 12-13, 2019. Kherson : KSMA, 2019. – P. 110-112.

9. Kolbasenko O., Kundenko M., Vakhonina L., Rudenko A., Mardziavko V. Improving the reliability of elements of energy installations when combustion of different quality fuel. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (Kremenchuk, September 27-30, 2023). Kremenchuk, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2023. – P. 1-6 (Scopus).

10. Kolbasenko O., Kundenko M., Sadovoy O., Rudenko A., Mardziavko V. Research of the vibration mode of combustion of water-fuel emulsion for improving the efficiency indicators of the power plant. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (Kremenchuk, September 27-30, 2023). Kremenchuk, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2023. – P. 1-7 (Scopus).

11. Kolbasenko O.V., Dymo B.V., Anastasenko S.M., Stelmakh O.. Increasing the efficiency of combustion of water-fuel emulsions in the ICE. *Ship*

power engineering: state and problems : Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference, Mykolaiv, November 07-08, 2023. Mykolaiv : Publisher Torubara V.V., 2023. – P. 181-188.

12. Kolbasenko Oleh, Dymo Borys, Anastasenko Serhii, Stelmakh Oleksiy. Increasing the efficiency of combustion of water fuel emulsions in internal combustion engines. *Modern installations generating installations in transport, technologies and equipment for their maintenance*. 15th International Scientific and Technical Conference, Kherson, March 13-15, 2024. Kherson : Kherson State Maritime Academy, 2024. – P. 42-45.

13. Kolbasenko O., Dymo B. Efficiency of water input into the flame on combustion quality and nitrogen oxide emissions. *Innovations in shipbuilding and ocean engineering* : XV International Scientific and Technical Conference : proceedings, Mykolaiv, September 26-27, 2024. Mykolaiv : National University of Shipbuilding, 2024. – P. 72-175.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ У НИЗЬКОЕМІСІЙНИХ ПАЛИВНИХ ПРИСТРОЯХ.....	15
1.1 Основні напрямки дослідження процесів горіння палива в низькоемісійних камерах згорання.....	15
1.2 Вплив води на процеси горіння в паливних установках.....	16
1.3 Особливості спалювання водопаливних емульсій.....	22
1.3.1 Вплив перемішування на процес горіння на процес горіння паливних сумішей в низькоемісійній камері згорання.....	22
1.3.2 Вплив упорскування водяної пари на нестійкість горіння і токсичність димових газів.....	23
1.3.3 Вплив якості води.....	26
1.4 Організація процесу дифузійного горіння емульсій.....	30
1.5 Активація передполум'яних процесів та промотування горіння розпиленого рідкого палива.....	32
1.6 Методи керування нестійким режимом горіння.....	33
Висновки до розділу 1.....	42
РОЗДІЛ 2. ТЕРМОАКУСТИЧНІ ПРОЦЕСИ У КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПОПЕРЕДНЬО ПІДГОТОВЛЕНОЇ ВПЕ.....	44
2.1 Процес виникнення коливань при горінні паливних сумішей.....	44
2.2 Основні теоретичні підходи до вивчення термоакустичних коливань.....	46
2.3. Особливості процесу мікрровибуху краплі водопаливної емульсії.....	48
2.4 Дослідження вібраційного режиму горіння водопаливної емульсії для підвищення показників ефективності енергетичної установки.....	51
2.5 Процес горіння окремих частинок вуглецю в акустично пульсуючому потоці.....	56

2.6 Механізми фазових перетворень у краплях водо-паливної емульсії.....	59
Висновки до розділу 2.....	63
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОРОЗІЇ ТА ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ.....	65
3.1 Виникнення високо- і низькотемпературної корозії при спалюванні рідких палив.....	65
3.2 Корекція фізико-хімічного складу водопаливних емульсій при спалюванні в котельних установках.....	70
3.3 Експериментальні дослідження корозії при спалюванні ВПЕ.....	75
3.4 Дослідження інтенсивності корозії при використанні водопаливної емульсії.....	81
3.5 Дослідження кінетики корозійних процесів.....	88
Висновки до розділу 3.....	96
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛСІЇ В КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ.....	99
4.1 Конструктивні рішення для підвищення ефективності робіт котлів на мазуті з урахуванням впливу корозії на поверхні нагріву.....	99
4.2 Вплив способів введення води в полум'я на ефективність горіння і викиди оксидів азоту при спалюванні ВПЕ.....	108
4.3 Вплив пасивації поверхонь нагрівання на інтенсивність низькотемпературної корозії.....	116
4.4 Підвищення надійності елементів енергетичних установок при спалюванні палива різної якості.....	119
Висновки до розділу 4.....	125
ВИСНОВКИ.....	129
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	133
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	146

ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ	149
------------------------------------	-----

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Використання в енергетичних установках водопаливних емульсій (ВПЕ) дозволяє частково замінити традиційні види вуглеводневого палива водою, що значно знижує їх загальну витрату. Це питання є особливо актуальним в сучасних умовах зростання вартості енергоносіїв та обмеженості їх доступності, в тому числі в Україні. Згідно існуючих даних, спалювання водопаливних емульсій дозволяє отримати: економію вуглеводневого палива (мазут, дизельне паливо) від 2 до 8 % в ДВЗ, а в котельних установках – від 2 до 20 %. Зменшення викидів токсичних оксидів для NO_x складає 25...45 %, SO_2 – 25...35 %, сажі – 60...80 %. Також при цьому спостерігається зниження інтенсивності корозійних процесів і забруднення поверхонь нагріву. Особливо актуальним є використання ВПЕ для спалювання важких залишкових сірчистих мазутів, бітуму, а також при знищенні нафтовмісних вод, що покращує показники роботи енергетичного обладнання та зменшує шкідливі викиди в довкілля.

Значні діапазони зміни параметрів, що визначають ефективність спалювання ВПЕ, пояснюється не тільки різними якісними характеристиками органічного палива і води (для якої досі не регламентовані значення параметрів для підготовки ВПЕ), але передусім технологічними особливостями підготовки ВПЕ, які забезпечать найкращі комплексні показники ефективності спалювання емульсій – економічність, екологічність та надійність в паливних агрегатах (ДВЗ, ГТД, котельні установки). Тому на сьогодні питання дослідження якісної підготовки ВПЕ залишаються актуальним.

Не існує однозначної думки щодо визначення адіабатної температури T_a горіння ВПЕ, значення якої залежить від величини тепловиділення в камері згоряння (особливо при зміні водовмісту емульсії). Визначення температури T_a є важливим фактором при проведенні теплотехнічних розрахунків енергетичних агрегатів (складанні теплових балансів, розрахунку ККД, процесів теплообміну в топкових камерах або камерах згоряння). В основному

прийнято враховувати фізичний вплив води, внаслідок чого зі збільшенням водовмісту ВПЕ значення T_a повинно знижуватися через витрату теплоти на підігрів і випаровування води в емульсії. При цьому вважається, що тільки за рахунок мікрровибухів крапель ВПЕ і вторинного диспергування можливе підвищення тепловиділення та зростання температури горіння. Також додатково враховується і хімічний механізм процесу, сутність якого полягає у дисоціації молекул води і появі молекулярного водню, внаслідок горіння якого можливе зростання тепловиділення при водовмісті емульсії 5...10 %.

У загальноприйнятих методиках теплового розрахунку котлів відсутні рекомендації щодо оцінки значення теплоти згорання ВПЕ Q_n^p , що пов'язано з недостатньою кількістю експериментальних даних та їх суперечливістю. Також неповними є дані щодо величини втрат теплоти в котлах при спалюванні ВПЕ в залежності від водовмісту W^p і коефіцієнту надлишку повітря α .

Існує обмежена кількість досліджень щодо істотного зниження інтенсивності низькотемпературної сірчаноокислотної корозії (НТК) при спалюванні ВПЕ з вологовмістом до 30 %, що дозволяє знизити температуру вихідних газів і підвищити ККД котлів. Але в них не визначена залежність інтенсивності НТК від величини α .

В останній час значна увага приділяється електричним теоріям кавітаційних процесів. Суперечливі думки про можливості проходження мікрровибухів в камерах згорання (КЗ), впливу їх на процес горіння викликає необхідність проведення додаткових досліджень механізму згорання ВПЕ, при якому забезпечується економія органічного палива.

Тому сьогодні актуальними є дослідження процесів активації ВПЕ та її спалювання з метою розробки рекомендацій для оцінки якості підготовленої водопаливної емульсії, визначення максимального рівня тепловиділення і значення адіабатичної температури, оцінці інтенсивності теплообміну в топках котельних установок і конвективних поверхонь нагріву, ефективності спалювання емульсії та розробки уточненої методики розрахунку енергетичних установок з урахуванням особливостей процесу горіння при використанні

емульсій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати, які лягли в основу дисертаційної роботи, були отримані під час виконання наукових досліджень за науково-дослідною темою № 0111U002309 «Теоретичні основи підвищення стійкості процесів горіння вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних стабілізаторів», що виконувалася відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки України «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» (напрямок 6), а також у відповідності до плану НДР обласної програми з енергозбереження, затвердженою рішенням сесії Херсонської обласної Ради № 320 від 12.12.2000 р. У цих роботах здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є наукове обґрунтування теоретичних положень і розробка практичних рішень щодо підвищення техніко-економічних, екологічних показників роботи та надійності експлуатації котельних установок при спалюванні водопаливних емульсій.

Реалізація даної мети пов'язана з вирішенням таких завдань:

- проаналізувати особливості процесу спалювання водопаливних емульсій та визначити основні фактори впливу на якість горіння, емісію шкідливих речовин та стан поверхонь нагріву;
- визначити рівень інтенсивності швидкості високотемпературної та низькотемпературної корозії сталей при різному солемісті води у ВПЕ та коефіцієнті надлишку повітря;
- експериментальним шляхом визначити рівень економії вуглеводневого палива при використанні ВПЕ з різним водовмістом;
- провести порівняльний аналіз інтенсивності виходу шкідливих речовин при спалюванні мазуту та ВПЕ з різним водовмістом;
- за допомогою методів статистичної обробки отримати рівняння для

прогнозування інтенсивності корозійних процесів на поверхнях нагріву котельних установок при використанні ВПЕ у якості палива;

- розробити рекомендації щодо конструктивних рішень для котельних установок різного цільового призначення за умов спалювання ВПЕ з високим водовмістом;

- експериментально визначити рівень емісії шкідливих речовин за умов спалювання ВПЕ та при впорскуванні води при використанні мазуту;

- отримати рівняння для визначення швидкості приросту забруднюючих речовин на поверхнях нагріву при спалюванні ВПЕ для оцінки надійності роботи обладнання.

Об’єкт дослідження – фізико-хімічні процеси, що відбуваються при спалюванні водопаливних емульсій в топкових камерах котельних установок.

Предмет дослідження – закономірності, що характеризують процес спалювання водопаливних емульсій та їх вплив на ефективність, екологічність та надійність роботи котельних установок.

Методи дослідження:

- на дослідницькій установці проведеі експериментальні дослідження впливу мінеральної частини мазуту та води, температури поверхні металі та коефіцієнту надлишку повітря при різному солемісті води при спалюванні ВПЕ на інтенсивність корозії та вихід шкідливих речовин;

- верифікація чисельних та експериментальних досліджень була проведена за допомогою методу порівняння для підтвердження точності отриманих результатів;

- для аналізу результатів досліджень та отримання апроксимаційних рівнянь, що дозволяють прогнозувати розвиток корозії, використано методи математичної статистики. Це дозволило оцінити адекватність отриманих результатів та розробити рекомендації щодо використання в котельних установках ВПЕ на основі мазуту для забезпечення ефективної та надійної їх експлуатації.

Наукова новизна отриманих результатів. У результаті виконання

дисертаційної роботи:

- на основі проведених експериментальних досліджень отримані нові апроксимаційні залежності для визначення інтенсивності високо- та низькотемпературної корозії при використанні водопаливних емульсій з різним співвідношенням паливо/вода та вмістом сірки в діапазоні коефіцієнтів надлишку повітря 1,01-1,5;

- вперше розроблено прикладне рішення щодо компонування котельних установок з використанням скрубєрів з підігрівом повітря і підсушкою газів та надані рекомендації щодо вибору матеріалів, які забезпечують надійну роботу обладнання при температурі стінок нижче 70 °C за умов використання водопаливних емульсій, теплоти конденсації водяної пари та пари сірчаної кислоти;

- вперше запропоновано технологію комплексного використання паливно-енергетичних і водних ресурсів з електродіалізною обробкою води для суднових котлів, особливістю якої є наявність кавітаційної обробки різного рівня інтенсивності на всіх етапах попередньої підготовки води, палива або нафтомасловмісних вод перед змішуванням у кавітаторі;

- отримано нове рівняння для визначення швидкості забруднення поверхонь нагріву котлів та газоходів, що враховують вплив коефіцієнта надлишку повітря, вмісту сірки та води у водопаливній емульсії при наявності корозійних процесів для широкого діапазону зазначених параметрів.

Практична значимість отриманих результатів полягає в можливості використання отриманих в дисертаційній роботі даних щодо особливостей експлуатації котельних установок при використанні в якості палива водомазутних емульсій з різним вмістом води на підприємствах, які спеціалізуються на роботах з проєктування та модернізації котельного обладнання різного цільового призначення. При цьому:

- отримані шляхом обробки експериментальних даних рівняння для визначення інтенсивності високо- та низькотемпературної корозії дозволять здійснювати довгострокове прогнозування динаміки розвитку корозійних

процесів при спалюванні водопаливних емульсій різного складу;

- надані рекомендації щодо можливого рівня температури стінок поверхней нагріву котлів для різних марок сталі з урахуванням вмісту сірки та солевмісту води для приготування емульсії;

- використання розроблених конструктивних рішень щодо компоновання котельних установок з використанням скрубера з підігрівом повітря і підсушкою газів дозволить забезпечити майже 100 % утилізацію теплоти конденсації пари сірчаної кислоти і водяної пари при надійній роботі конденсаційних поверхонь котлів і їх газоходів при температурі стінок менше 70 °С при спалюванні водопаливної емульсії;

- запропонована технологія комплексного використання паливно-енергетичних і водних ресурсів з електродіалізною обробкою води для отримання ВПЕ передбачає використання ділюату для кавітаційного приготування водопаливної емульсії та католіту для зрошення скруберів, що надає можливість використання теплоти конденсації пари H_2SO_4 і H_2O та забезпечує підвищення техніко-економічних та екологічних показників енергетичних установок;

- отримане рівняння багатовимірної регресії дозволяє прогнозувати інтенсивність забруднення поверхонь нагріву та газоходів котельних установок при використанні ВПЕ з урахуванням впливу комплексу параметрів – коефіцієнту надлишку повітря, вмісту сірки та вологовмісту емульсії у широкому діапазоні, що відповідає реальним режимам роботи обладнання.

Результати досліджень впроваджено (Додаток Б):

- в ХЦКБ «Енергопрогрес» ТОВ «Котлотурбопром» (м. Харків) при розробці методів розрахунків процесів спалювання ВПЕ в котельних установках;

- в навчальний процес кафедри «Теплотехніка та енергоефективні технології» Національного технічного університету «ХПІ».

Авторський внесок здобувача полягає в отриманні нових даних щодо процесу розвитку високо- та низькотемпературної корозії при спалюванні

водопаливних емульсій та розробці рішень щодо підвищення надійності та ефективності експлуатації котельного обладнання, що забезпечує виконання поставлених в дисертаційній роботі наукових завдань. Результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто та в співавторстві опубліковані у публікаціях (Додаток А):

А) фахові видання України:

[1] – здобувач виконав експериментальні дослідження низькотемпературної корозії при спалюванні водопаливних емульсій із вмістом води 2-30 % та провів обробку отриманих результатів. Співавторами: Димо Б.В. проведено порівняльний аналіз отриманих даних з результатами інших авторів; Горячкиним А.В. та Корнієнко В.С. розроблено методику проведення досліджень на експериментальній установці;

[2] – здобувач провів аналіз впливу кавітаційно-циркуляційної підготовки води і водопаливної емульсії на зниження шкідливих викидів при спалюванні вуглеводневих палив. Співавтором Філіпщуком О.М. виконано аналіз існуючих методів зменшення емісії SO_x та NO_x в теплоенергетичному обладнанні;

[3] – здобувач провів аналіз впливу різних способів введення води в полум'яний простір та визначив вплив цього фактору на ефективність спалювання водопаливних емульсій та зменшення викидів шкідливих речовин;

[4] – здобувачем були розроблені схемно-конструктивні рішення та рекомендації щодо підвищення ефективності комплексного використання паливно-енергетичних і водних ресурсів у суднових енергетичних установках при спалюванні водопаливних емульсій. Співавтор Філіпщук О.М. брав участь у проведенні експериментальних досліджень для визначення впливу солевмісту, рівня кавітаційної обробки і водовмісту ВПЕ на процес горіння, ним проведено оцінку погрішності вимірювань.

Б) інші публікації:

[5] – здобувач провів аналітичний аналіз впливу кавітаційної підготовки водопаливної емульсії на якість спалювання вуглеводневих палив та обґрунтував використання жорсткого режиму кавітаційної підготовки.

Співавторами: Горячкиним В.Ю., Горячкиним А.В. проаналізовано причини та фактори, що впливають на зменшення шкідливих викидів при спалюванні ВПЕ;

[6] – здобувач визначив рекомендований оптимальний рівень температур підігріву в скрубєрі мокрого типу для додаткового очищення продуктів згоряння водопаливних емульсій від оксидів CO, CO₂ та NO_x. Співавтором Горячкиним А.В. досліджено вплив лужності води емульсії на роботу скрубєра;

[7] – здобувачем розроблено методику та проведено дослідження складного теплообміну пульсуючого режиму горіння водопаливної емульсії з водовмістом до 30 %. Обґрунтовано інтенсифікуючий вплив акустичних коливань внаслідок існування локальних мікрровибухів крапель водопаливної емульсії. Співавторами: Горячкиним А. В., Дем'яненко В. С виконано аналіз одночасного впливу на процеси горіння ВПЕ електрохімічних реакцій і ударних хвиль;

[8] – здобувач виконав аналіз даних дослідження промислового котла при роботі на чистому паливі та водопаливних емульсіях та надав рекомендації щодо оптимального значення коефіцієнта надлишку повітря при спалюванні водопаливних емульсій. Співавторами: Димо Б.В., Горячкін А.В., Язловецький А.В. проаналізували можливість використання плазмових технологій при спалюванні ВПЕ;

[9] – здобувачем виконано статистичну обробку даних та отримано апроксимаційні залежності питомих показників інтенсивності забруднення поверхонь нагріву котельних установок при спалюванні ВПЕ різного складу. Співавторами: Кунденко М., Руденко А. проведений аналіз даних щодо інтенсивності забруднення поверхонь при спалюванні водопаливної емульсії; Лахоніною В. та Мардзявко В. проведений аналіз даних щодо динаміки шкідливих викидів при спалюванні ВПЕ з різним вмістом води та сірки.

[10] – здобувачем проаналізовані можливі механізми самозбудження акустичних коливань в процесі горіння палива в камерах згорання. Співавторами: Кунденко М., Садовим О. досліджено механізми фазових перетворень у краплинах водопаливної емульсії.; Руденок А., Мардзявко В.

виконали аналіз публікацій щодо проблеми досліджень термоакустичних процесів у камері згоряння при використанні попередньо підготовленої водопаливної емульсії;

[11] – здобувачем проаналізовано фактори, що впливають на підвищення ефективності спалювання водопаливних емульсій в ДВЗ. Співавторами: Димо Б.В., Анастасенко С.М., Стельмах О.І. виконано оцінку рівня економії чистого палива при використанні водопаливної емульсії в ДВЗ;

[12] – здобувачем проведено якісне та кількісне оцінювання впливу водопаливної емульсії при використанні її в якості палива в дизельних двигунах. Співавтори: Димо Б.В., Анастасенко С.М., Стельмах О.І. визначено закономірності взаємодії вуглеводнів та їх радикалів з молекулами і продуктами дисоціації води в процесі згоряння ВПЕ;

[13] – здобувачем виконано порівняльні дослідження спалювання ВПЕ та мазуту з різними способами впорскування води та водяної пари в зону горіння. Співавтор Димо Б.В. виконав аналіз результатів.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: III Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, фахівців, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (м. Маріуполь, 2017 р.); V Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (м. Миколаїв, НУК, 2018 р.); X, XV Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (м. Херсон, 2019, 2024 рр.); XI Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми» (м. Миколаїв, 2023 р.); IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) (м. Миколаїв, 2024 р.) (Scopus); XV Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, 2024 р.).

Публікації. Основні положення і результати дисертаційних досліджень,

які виносяться на захист, опубліковані у 13 наукових працях: 4 статях – у наукових періодичних фахових виданнях України категорії «Б»; 9 – у матеріалах апробаційного характеру, з них 2 – у наукових конференціях, індексованих в наукометричній базі Scopus.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 129 сторінках, серед них: 37 рисунків по тексту, 3 рисунки на 3 окремих сторінках, список використаних джерел зі 115 найменувань на 13 сторінках та 2 додатки на 6 сторінках. Загальний обсяг роботи складає 151 сторінку.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ У НИЗЬКОЕМІСІЙНИХ ПАЛИВНИХ ПРИСТРОЯХ

1.1 Основні напрямки дослідження процесів горіння палива в низькоемісійних камерах згоряння

За даними [1-4] найбільший розвиток одержала технологія спалювання бідних, попередньо перемішаних паливно-повітряних сумішей. За цією технологією створені практично всі низькоемісійні камери згоряння провідних виробників. Виявлення кінетичних механізмів запалення та горіння різних палив, а також механізмів утворення екологічно небезпечних сполук у камерах згоряння енергетичних установок і двигунів дозволяє не тільки правильно визначити такі важливі характеристики, як межі стійкого горіння, температуру та час затримки запалення, швидкість поширення полум'я, довжину зони енерговиділення, динаміку зміни концентрацій різних компонентів, але ще на стадії проектування оцінити емісію забруднюючих атмосферу газоподібних сполук (NO_x , CO , CO_2 , SO_x , H_2SO_4 , C_nH_m й ін.) і аерозольних компонентів (сажові частки, сульфатні та органічні аерозолі, конденсаційні сліди). Саме тому побудові детальних реакційних механізмів, що адекватно описують складні взаємозв'язки між різними сполуками, які беруть участь у фізико-хімічних процесах при горінні органічних палив, приділяється особлива увага. Важливу роль ці питання відіграють не тільки при створенні енергоефективних низькоемісійних камер згоряння для енергетичних установок, але також і для різних типів двигунів внутрішнього згоряння.

Можна виділити декілька напрямків досліджень організації процесів горіння, які вимагають додаткового вивчення кінетики протікання ланцюгових реакцій і механізмів утворення екологічно небезпечних сполук. До цих напрямків відносяться:

- горіння синтетичних і альтернативних палив, включаючи біопалива;

- горіння складних композитних палив: попутні нафтові гази, продукти піролізу та риформінгу важких вуглеводневих палив.

Крім того, окрему групу процесів складають:

- горіння, що стимулюється низькотемпературною нерівноважною плазмою, у тому числі низькотемпературне спалювання ультрабідних паливоповітряних сумішей (ППС);
- плазмохімічний піроліз, газифікація та спалювання низькокалорійних палив.

Ці напрямки потребують проведення комплексних досліджень, що включають аналіз елементарних реакцій квантово-хімічними методами, побудову нових реакційних механізмів не тільки для опису запалення і горіння, але й формування різних екологічно небезпечних компонентів, чисельне моделювання процесів горіння, а також експериментальне дослідження як кінетики протікання реакцій, так і самих процесів горіння.

Аналіз результатів експериментальних досліджень дозволяє отримати емпіричні залежності для використання їх в розрахункових моделях, що дає змогу більш точно описати процеси горіння різних видів палива. Такі дослідження є базою для подальшого розвитку методів розрахунку кінетичних характеристик процесів горіння палива.

1.2 Вплив води на процеси горіння в паливних установках

Вплив присадки води на процес згоряння палива у ДВЗ було проаналізовано в роботах [5-7]. Одним із варіантів було використання важкокисневої води H_2^{18}O , яка вводилася в циліндр двигуна з робочою сумішшю. Аналіз складу димових газів показав, що в сполучі з вуглецем у вигляді CO_2 знаходилося до 60 % уведеної кількості ізотопу ^{18}O .

Значний інтерес становлять питання хіміко-кінетичного характеру, пов'язані з процесом горіння обводнених палив. Установлено, що під дією

високої температури можлива не тільки термічна дисоціація молекул пари води, але й дисоціація на водень і гідроксил, тобто $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + 2\text{HO}$.

Дана рівновага була вивчена Бонгеффером і Рейхардтом, які виявили гідроксил у парах води, нагрітих до 1000...1650 °С. Поява в зоні полум'я великої кількості активних центрів гідроксилу і атомарного водню ($\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$) може в багато разів прискорити реакції окислювання та горіння вуглеводневих палив. Штерн і Поляк експериментально довели, що при окислюванні вищих парафінів одним з радикалів, що утворює основний ланцюг реакції, є гідроксил [8].

Прискорювальну дію водяної пари на процес горіння оксиду вуглецю було пояснено сумарною реакцією $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$. Наступне окислювання водню приводить до утворення гідроксилу OH і атомів H та O , які є активними центрами.

Було встановлено, що дія водяної пари і водню в зоні полум'я є однаковою, причому відсоток вигорання вуглецю C зі збільшенням вмісту H_2O різко зростає. Був зроблений висновок про те, що вода є не тільки ініціатором ланцюгів у реакції, але й бере участь у розвитку самих ланцюгів [9].

П. Волькер і К. Райт указують на сильне зростання швидкості поширення полум'я при горінні окису вуглецю при додаванні незначної кількості сполук, що містять водень. Вони визначили, що швидкість поширення полум'я в сумішах окису вуглецю з повітрям збільшується з 16 м/с для сухої CO до 55 м/с для CO із добавкою 9,4 % води. Вище цієї концентрації вода вже є не джерелом водню, а стає розріджувачем [11].

Як відомо, основним елементом хімічного недопалу в дизельних двигунах є сажа. Тому значний інтерес представляють реакції газифікації вуглецю $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$ та $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$. Тут водень, що виділяється в процесі реакції, реагує з киснем значно активніше і швидше, ніж частки вуглецю.

У роботах [12-15] визначається, що однією з основних причин покращення робочого процесу дизеля при переведенні його на водопаливну емульсію є хімічний механізм. Однак існують інші міркування. Тут насамперед

треба відзначити, що при згорянні 1 кг дизельного палива в середньому утворюється 1,17 кг водяної пари, яка повинна інтенсифікувати процес згоряння. Додаток додаткових 0,1...0,3 кг води у ВПЕ не може істотно змінити хід хімічних реакцій. Крім того, приблизно така ж маса водяної пари надходить у циліндр двигуна з атмосферним повітрям на 1 кг палива. В умовах експерименту (гомогенна суміш) введення додаткової пари води зменшує швидкість згоряння пари палива, тобто вода була не каталізатором, а розріджувачем. Аналогічні результати були отримані в інших роботах, де досліджувався вплив водяної пари на швидкість згоряння метану [16].

Проаналізувавши представлені вище результати досліджень, можна зробити висновок про покращення якості робочих процесів в дизельних двигунах при переході на емульговане паливо. В роботі [17] представлена спроба показати це на прикладі об'ємного сумішоутворення. В цьому випадку значним недоліком є надлишок палива в центральній області факела, де при досягненні високих температур складаються відповідні умови для термічного розкладання палива з інтенсивним виділенням вільного вуглецю. Він недостатньо активно взаємодіє з киснем, що призводить до сповільнення процесу згоряння. Крім того, частина сажі не встигає згоряти за час перебування в циліндрі та частково викидається в атмосферу. Все це веде до зниження ККД двигуна. Особливо несприятлива картина спостерігається при використанні важких сортів палива і форсуванні двигунів.

Однак основний вплив на робочий процес двигуна мають мікрОВИбухи та збільшення місцевих коефіцієнтів надлишку повітря α [7, 18]. МікрОВИбухи впливають на асфальтосмолисті залишки, розбиваючи їх, та зменшуючи при цьому діаметр часток коксу. Це викликає їх більш швидке згоряння при контактуванні з киснем, а також прискорює протікання газифікації. МікрОВИбухи відіграють значну роль в дробленні крапель більших розмірів. Зростання значень локальних коефіцієнтів α приводить до підвищення швидкості згоряння та скорочення сажоутворення.

Крім того, не можна применшувати роль водяної пари як каталізатора

хімічних реакцій окислювання й газифікації вуглецю. Результати досліджень були отримані при горінні гомогенних однорідних систем [19]. У цьому випадку для прискорення реакцій окислювання цілком вистачає вологи, що утворюється в процесі горіння, і добавка води тут має негативний ефект. Але в цьому випадку не враховується ефективність уведення надлишкової кількості активних часток на прискорення процесу горіння. Інша справа – високотемпературні процеси в центрі струменя, де не вистачає кисню, горіння практично відсутнє і відбувається термічне розкладання пального. У цьому випадку особливу роль варто відвести реакціям газифікації вуглецю, що дозволяє істотно скоротити тривалість горіння в дизелі внаслідок більш швидкого окислення водню у порівнянні з сажею.

Існує кілька гіпотез щодо характеру впливу ВПЕ на процеси горіння палива [20]. За результатами експериментів із краплями ВПЕ величиною 0,3...0,5 мм, закріпленими на підвісі, робиться висновок, що при нагріванні відбувається закипання водяного ядра краплі, що приводить до її мікровибуху. Таким чином, вважається, що при горінні ВПЕ відбувається вторинне розпилювання крапель, краще використовується повітряний заряд і підвищується ефективність процесу горіння.

Очевидно, що крім фізичних факторів, що характеризують процеси упорскування та сумішоутворення ВПЕ, існують і хімічні, викликані різким збільшенням кількості води та змішуванні водяної пари з парою палива.

Аналізуючи наведені в [20] дані, можна відзначити, що найбільш інтенсивно протікають процеси розпаду молекул вуглеводнів. Константа швидкості дисоціації води на чотири порядки вище, ніж у кисню й тим більше азоту, що свідчить про високу ймовірність прямої взаємодії продуктів дисоціації води (радикалів гідроксилу) з молекулами вуглеводню й органічних радикалів. Необхідно також ураховувати високу ймовірність взаємодії молекул води з найбільш активними радикалами, тому що енергія активації реакції не може бути значною, а концентрація вуглеводневих радикалів у факелі ВПЕ багаторазово перевищує концентрацію інших радикалів. Оскільки розпад

вуглеводнів при температурі більше 1500 К протікає практично миттєво, то швидкість згоряння палива лімітується тільки швидкістю підведення окислювача, тобто його дифузії.

Попереднє окислювання вуглеводнів ВПЕ збільшує швидкість і повноту згоряння палива. Саме цим можна пояснити настільки істотний вплив процентного вмісту води у ВПЕ на концентрацію сажових часток. Вони утворюються при коагуляції продуктів глибокого крекінгу вуглеводнів у зонах, де має місце сильний дефіцит кисню. Присутність пари води й гідроксильного радикала забезпечує попереднє окислювання сажових зародків, що запобігає їх коагуляції й приводить до їх повного наступного догорання.

В [21] було виконано дослідження, що характеризують процес хімічної активації горіння паливної суміші молекулами води. Для визначення ступеню участі кисню води в процесах окислювання вуглеводнів, що відбуваються в камері згоряння високооборотного дизеля, було проведене дослідження на двигуні 1ЧН18/20. Як паливо використовувалася 40 % ВПЕ. Для приготування порівняльної проби використовувалася дистильована вода, а для аналізованої проби додавалася вода, збагачена ізотопом кисню ^{18}O . Результати проведеного аналізу за допомогою мас-спектрометрії довели, що активна частка кисню із складу води водопаливної емульсії, яка приймала участь в окислюванні вуглеводнів, становить 60 %.

Отримані результати дозволили зробити висновок, що при використанні висококонцентрованих емульсій процеси згоряння в дизельних двигунах в основному характеризуються закономірностями хімічної кінетики взаємодії вуглеводнів палива та їх радикалів з молекулами та продуктами дисоціації води. Таким чином, водопаливну емульсію не можна вважати результатом простого змішування палива з хімічно інертною рідиною, а вона є окремим видом палива, що здатне кількісно і якісно змінювати процес горіння в енергетичних установках та двигунах.

У роботі [22] наведені результати використання явища кумулятивного удару для покращення розпилення мазуту та у перспективі – водовугільних

суспензій. Переваги, що досягаються від кумулятивного «схлопування» асиметричних кавітаційних пухирців, полягають у прямому дробленні плівки рідини на краплі.

Така технологія потребує вдосконалення конструкції відцентрових форсунок, у результаті чого був розроблений спеціальний кавітатор. Завдяки наявності тонкої фракції (10...15 мкм) довжина факела і тривалість вигорання стає меншою, а повнота згоряння рідкого палива за кавітатором більше, ніж у сучасних відцентрових форсунок. При роботі з кавітаторами низького тиску при надлишку повітря $\alpha = 1,05$ була досягнута концентрація NO 9,1 ppm (19 мг/м³) з вихровим пальником, а на конвективних поверхнях зникли спечені відкладення. Вони перетворилися в порошок, легко змиваний водою, а вміст ванадію в цих відкладеннях збільшився на 40 %. При важкій кавітації полум'я оремульсії та полум'я мазуту характеризуються стабільністю горіння в сліпуче білому випромінюванням. Тут відбувається дисоціація вуглеводнів і мінеральних часток з наступним їхнім реагуванням і переходом продуктів реагування у вихідний стан.

ВПЕ, створені на основі вуглеводневого палива, є багатокомпонентними хімічними системами, характеристики горіння яких не систематизовані. Багато позитивних ефектів емульгування рідких палив, пов'язані з їхньою економією та сажоутворенням, проявляються при використанні тільки розпиленого леткого палива. У зв'язку із цим значну увагу приділялося дослідженню процесу горіння одиночних крапель і струменів аерозолів емульсій. При цьому враховувалися різні механізми випару палаючої краплі, де головна роль приділялася леткості компонентів, їх взаємної концентрації та температурі кипіння [23, 24].

Розглянуті різноманітні механізми випару краплі, що горить у відкритій атмосфері, зводяться практично до двох груп: до так званих мікрровибухів, тобто до кількарязового дроблення краплі емульсії в результаті скипання внутріфазових водних включень, що досягла температури перегріву або до моделі випару краплі під час відсутності інтенсивної внутрішньої циркуляції,

коли швидкість фракційного випару кожного компонента визначається його масовою часткою [23, 25, 26].

Вважається також, що чим нижче випаровуваність палива, тим краще проявляються корисні ефекти емульгування, оскільки мікрровибухи будуть викликати ефект вторинного здрібнювання тільки тоді, коли вони з'являться перш ніж більша маса первісних крапель випарується або піролізується [27, 28]. До того ж, при розпиленні емульсій неоднорідність розмірів краплі зберігається, а при цьому всі характеристики горіння, зокрема, час початку мікрровибуху, тісно залежать від температури краплі.

1.3. Особливості спалювання водопаливних емульсій

1.3.1 Вплив перемішування паливоповітряної суміші на процес горіння паливних сумішей в низькоемісійних камерах згорання

Традиційно в камерах згорання газотурбінних енергетичних установок (ГТУ) використовувалося дифузійне спалювання палива, що забезпечує необхідну надійність, стійкість і економічність цього процесу. Значним недоліком цього процесу є висока емісія оксидів азоту NO_x . Прийняття нових екологічних вимог сприяло переходу на спалювання попередньо перемішаної бідної паливо повітряної суміші (ППС). Цей спосіб дозволяє значно знизити утворення термічних оксидів азоту.

Використання такого способу спалювання бідних ППС часто приводить до виникнення вібраційного або нестійкого горіння на деяких режимах роботи енергетичних установок. Це супроводжується коливаннями тиску в топленні (або камері згорання) зі значними амплітудами, що може привести до вібрацій та руйнування окремих елементів установки. Незначні зміни у складі паливної суміші можуть впливати на стійкість її запалення, викликають коливання величини тепловиділення, що при виникненні резонансу з акустичною хвилею

приводить до пульсацій тиску. Крім того, у камерах згоряння (КЗ) поширення полум'я пов'язано з аеродинамікою зони рециркуляції, тому коливання фронту полум'я істотно залежить від гідродинамічних процесів у цій зоні.

У роботі [4] представлені результати експериментальних і розрахункових досліджень модельної КЗ. Отримані співвідношення між чисельними й експериментальними даними дозволяють прогнозувати емісію NO_x і стійкість процесу горіння. Розрахункові дослідження проводилися за допомогою комп'ютерного моделювання [29, 30], де враховувався вплив різних фізико-хімічних ефектів (горіння, турбулентність й ін.).

Незначні зміни полів швидкості та подачі палива можуть істотно впливати на взаємне розташування фронту полум'я та зони зсувних плинів і, як наслідок, на виникнення пульсацій тиску.

Серед причин нестійкості горіння можна виділити гідродинамічну нестабільність процесу зрушення, що багаторазово підсилюється, коли поверхня фронту полум'я розташовується поблизу. Виходячи із цього, знизити амплітуду пульсацій тиску в даній конструкції пальникового пристрою можливо, змістивши фронт полум'я від зони з високими градієнтами швидкості та вихроутворенням шляхом зміни поля концентрації ППС на виході з основного пальника або подачею до 5 % пілотного палива. В якості такого палива пропонується ВПЕ з огляду на істотну активацію передполум'яних процесів і процесу горіння при використанні кавітаційно-підготовленої ВПЕ [31].

1.3.2 Влив упорскування водяної пари на нестійкість горіння і токсичність димових газів

У роботах [4, 32, 33] відзначається, що упорскування водяної пари в потік горючої суміші до стабілізатора полум'я в камерах згоряння газотурбінних двигунів (ГТД) сприяє стійкості процесу горіння. Однак водяну пару можна

вводити безпосередньо в зону реакції – рециркуляційну зону за стабілізатором полум'я. Було поставлене завдання визначення оптимальних умов упорскування водяної пари, що забезпечують усунення вібраційного горіння в камерах згорання. Границі вібраційного горіння залежно від витрат палива (пропану), повітря й пари, що впорскується, представлені на рисунку 1.1. У разі відсутності пари (крива 1) неможливо досягти границь вібраційного горіння, тому що при збіднінні або збагаченні суміші коливання потоку приводять до зриву полум'я зі стабілізатора (пунктирна лінія). Є межа по витраті повітря (0,85 г/с), нижче якої не вдається стабілізувати полум'я. При фіксованій витраті повітря вібраційне горіння спостерігається в інтервалах витрати пропану, що включають стехіометричне значення (пряма с-с). Для технічного пропану стехіометрична витрата визначається за виразом $m_p^* = m_p / 15,8$.

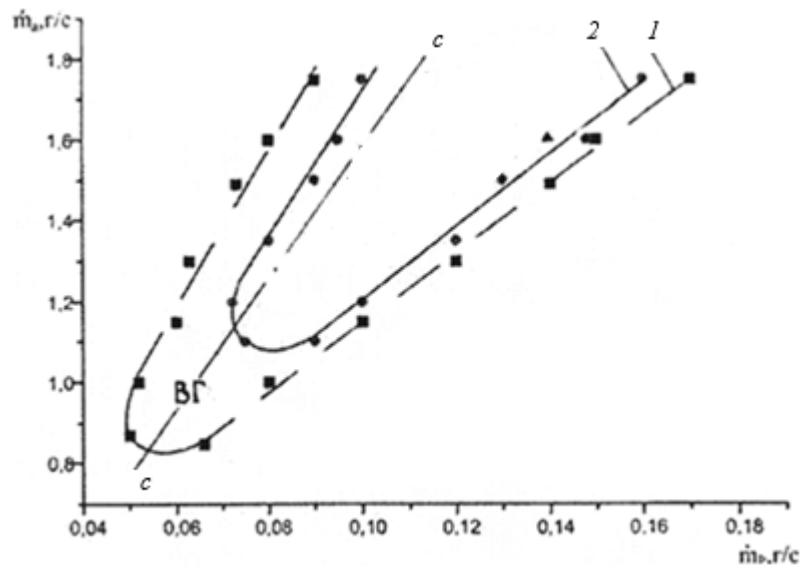


Рисунок 1.1 – Границі вібраційного горіння: 1 – $m_w = 0$; 2 – $m_w = 0,05$ г/с

Упорскування водяної пари до стабілізатора полум'я приводить до скорочення області тих значень витрати компонентів паливної суміші, при яких відзначається вібраційне горіння. З'являється границя вібраційного горіння (див. рис. 1.1, крива 2), де коливання газу в камері згорання припиняються.

Введення пари приводить до зниження частот коливань, що відповідало однаковим витратам пропану. Це обумовлено тим, що наявність водяної пари

знижує температуру горіння а, отже, і швидкість звуку в КЗ. При збільшенні витрати пари максимум залежності частоти коливань від витрати пального трохи зміщується до стехіометричного значення.

Отже, у режимі вібраційного горіння упорскування водяної пари в потік паливно-повітряної суміші до стабілізатора полум'я приводить до наступного:

1. Відбувається скорочення границь вібраційного горіння, меж стабілізації полум'я та їх зсув убік надлишку палива.

2. Амплітуда і частота акустичних коливань у камері згорання знижується.

3. Для фіксованих значень витрати пального і повітря кількість пари, що впорскується, необхідної для придушення акустичних коливань, збільшується при підвищенні амплітуди коливань, що виникають при горінні незабаластованої суміші.

4. При однакових амплітудах коливань для усунення вібраційного горіння сумішей, у яких вище вміст палива, необхідна добавка більшої кількості пари.

5. Щоб придушити вібраційне горіння при будь-якому співвідношенні палива і повітря, необхідно ввести в суміш кількість пари, що прямо пропорційно залежить від максимальної амплітуди акустичних коливань при горінні незабаластованої суміші [34].

Результати проведеного дослідження показали наступне:

1. Упорскування пари на стадіях подачі та горіння паливно-повітряної суміші дозволяє усунути вібраційне горіння.

2. Кількість пари, необхідної для придушення вібраційного горіння, залежить від амплітуди акустичних коливань у камері згорання, які необхідно усунути, і частки палива в суміші.

3. Найбільш ефективним для усунення вібраційного горіння є подача пари по центру рециркуляційної зони стабілізатора полум'я.

Проведені в ХФ НУК експериментальні дослідження показують, що ефективність процесу горіння при спалюванні ВПЕ більш висока, чим при введенні води і водяної пари в зону горіння [35].

Дослідження впливу уведення водяної пари і спалювання ВПЕ на процеси горіння, емісію NO_x , SO_2 і продуктів неповного згоряння автором роботи [36] проводилися на експериментальній установці при спалюванні необводненого мазуту М40 ($S^p = 1,8 \%$, $W^p = 2 \%$) при $\alpha = 1,5$ за умов уведення водяної пари до кореня факела та при спалюванні водомазутної емульсії (ВМЕ) на основі цього ж мазуту з вологістю 15 і 30 %.

Результати досліджень, представлені на рис. 1.2, показали, що процеси горіння при спалюванні обводненого та необводненого мазуту відрізняються за якістю горіння та за кількістю продуктів неповного горіння в димових газах по довжині й перетину топлення.

При спалюванні ВМЕ з $W^p = 15$ і 30 % вміст горючих компонентів H_2 , CH_4 і CO на відстані від зрізу пальника 100, 200 мм відповідно більше у 2 рази у порівнянні з режимом горіння при уведенні водяної пари у кількості, що відповідає 30 % води у ВМЕ. Незважаючи на це, до середини довжини факела, що спостерігається при спалюванні стандартного мазуту з $W^p = 2 \%$, відбувається практично повне вигорання H_2 , CH_4 і CO . Більш повільне згоряння цих компонентів при $W^p = 30 \%$ пояснюється більш низькою температурою в КЗ в порівнянні з процесом горіння ВМЕ при $W^p = 15 \%$.

1.3.3 Вплив якості води у ВПЕ

Ефективність роботи енергетичних установок, що використовують ВПЕ, залежить в значній мірі від якості підготовленої води, що є одним з компонентів водопаливної емульсії. Низька якість води може призвести до прискореного зношування деталей паливної системи.

При використанні сірчистих палив процес горіння ВПЕ призводить до утворення водяної пари, яка при реакції з сіркою утворює на поверхнях елементів установок сірчану та сірчисту кислоти. Це може спричинити корозію та відкладення солей у вигляді накипу. Наявність води також змінює механізм корозії, перетворюючи його з хімічного на електрохімічний.

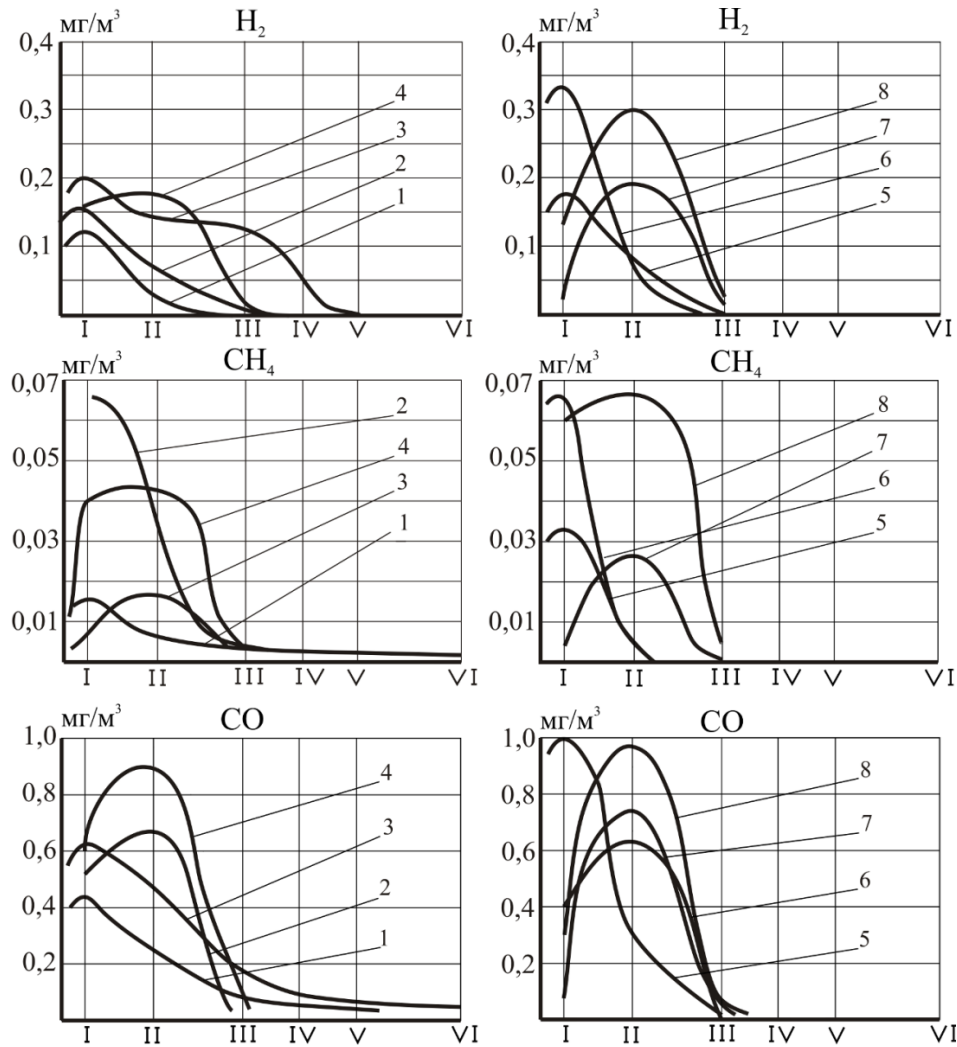


Рисунок 1.2 – Зміна вмісту CO , H_2 , CH_4 по довжині топлення при спалюванні мазуту М40 та ВМЕ при впорскуванні пари : 1 – мазут ($W^p = 2\%$) (центр топлення); 2 – мазут ($W^p = 2\%$) (у стінок топлення); 3 – при введенні водяних пар у топлення (центр топлення); 4 – при введенні водяних пар у топлення (у стінок топлення); 5 – водомазутна емульсія ($W^p = 15\%$) (центр топлення); 6 – водомазутна емульсія ($W^p = 15\%$) (у стінок топлення); 7 – водомазутна емульсія ($W^p = 30\%$) (центр топлення); 8 – водомазутна емульсія ($W^p = 30\%$) (у стінок топлення)

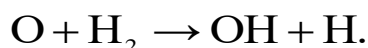
Тому вода для приготування ВПЕ повинна відповідати певним стандартам, має бути повністю вільною від корозійної активності та солей загальної жорсткості. Для досягнення цього необхідно застосовувати відповідні технології її підготовки.

Серед ефективних методів обробки води можна виділити електрохімічну

обробку в електролізері та озонування. Введення озону безпосередньо в систему подачі палива покращує детонаційний ефект, що пояснюється утворенням атомарного кисню:



Крім того, підвищення повноти згорання дизельного палива (ДП) знижує вплив викидів на навколишнє середовище. Підвищення швидкості високотемпературного запалення ДП при наявності атомів О викликано такими факторами. В момент зародження ланцюга відбувається заміна реакції розпаду RH більш вигідною енергетично реакцією з енергією активації $E = 120$ кДж/моль замість 490 кДж/моль. Поява О замість RH як початкових активних центрів дає можливість розвитку процесів горіння через прості розгалуження, як в процесі запалення водню:



Також можливий розвиток ланцюгово-теплогового вибуху з дуже короткою затримкою внаслідок високої початкової концентрації О.

Введення озону можливо як у повітря, так і в паливо та воду. Однак озонування повітря вимагає високої концентрації озону, тому введення O_3 в повітря виявилось недоцільним з економічної точки зору [37, 38].

Попередній озоноліз ДП сприяє появі в системі живлення великої кількості киснево-вмісних сполук, також можливе утворення продуктів конденсації неграничних і ароматичні сполуки. Тому з'являється необхідність проведення вторинної обробки (відстоювання або фільтрації) для забезпечення підвищення якості дизельного палива, що ускладнює конструкцію двигуна та збільшує вартість. Введення озону в ДП не може істотно збільшити продетонаційний ефект внаслідок того, що більша частина озону витрачається в процесах низькотемпературного окислювання RH , а в камеру згорання він майже не потрапляє.

Відзначені недоліки виключаються при озонолізі води перед її змішуванням з ДП. Розчинність озону у воді відбувається за законом Генрі. Значення коефіцієнту розчинності α та ентальпії розчинення озону у воді, незважаючи на великий розкид у їх значеннях ($\alpha = 0,200 \dots 0,286$, $\Delta h = 13 \dots 50$ кДж/моль), значно нижче коефіцієнта розчинності та ентальпії в органічних розчинниках. Це можливо пояснити при розчиненні неполярних молекул у воді зміною її мікроструктури.

Необхідно відзначити, що зі зменшенням рівня рН середовища розчинність озону закономірно знижується. Але кислі водяні розчини озону досить стійкі (у розчині $0,2$ М HClO_4 озон концентрації $1,6 \cdot 10^{-3}$ М руйнується при кімнатній температурі менш, ніж на 5% за добу). Введення озону в «тверду» воду також не є недоцільним, оскільки в розчинах солей ступінь розчинності озону зменшується.

Враховуючи вище зазначене, як найбільш оптимальний варіант слід розглядати подачу озону в систему живлення в складі католіта, що можна одержати в електролізері. При обробці води електрохімічним способом іони концентруються у приелектродних зонах. В наслідок цього відбуваються зміни фізико-хімічних властивостей води. З'являються дві складові: католіт з лужними властивостями та аноліт з кислотними властивостями.

Електрохімічні процеси збільшують рівень рН і ступінь насичення води тонкодисперсними газами O_2 і H_2 . Пр цьому відбувається вихід газів електролізу та спостерігається випадіння в осад нерозчинних солей (більш за все – в католіті), зменшуються загальна жорсткість електрохімічно обробленої води [39]. На вибір католіта для приготування ВПЕ впливають лужне середовище, знижена корозійна активність, відсутність солей загальної жорсткості.

В [40, 41] вивчений процес активації води при турбулентному русі рідини, що характеризується порушенням суцільності потоку (кавітаційний режим). Досліджено залежність стійкості метастабільного стану рідини від

уведеної енергії. Аналіз експериментальних даних показав появу гідроксильних радикалів під впливом гідродинамічного кавітаційного поля, які рекомбінують з подальшим утворенням молекул води або пероксиду водню H_2O_2 . З використанням математичного моделювання був запропонований механізм активації води та визначені константи швидкості хімічних реакцій. Дослідження проводилися на експериментальному кавітаційному стенді динамічного типу. Як робоче середовище використовували деаерований дистилят, дистилят і відстояну водопровідну воду.

Необхідно відзначити, що деаерований дистилят змінює рН на 4 %, дистилят – на 12 %, а водопровідна вода – на 16 %. Різницю у відсотках можна пояснити присутніми у водопровідній воді солями, з якими може зв'язуватися іон H^+ і газами.

1.4 Організація процесу дифузійного горіння емульсій

В роботі [42] розглянутий спосіб спалювання рідкого палива без його первинного розпилення. Обґрунтовано застосування емульгування і попереднього випару при використанні важкого високов'язкого палива. Показано, що температура та висота факелу слабо залежать від водного вмісту, у той час як зі збільшенням концентрації води прозорість полум'я зростає. При цьому відкладення нагару в камері випару відсутні, а частка сажі, що утворюється, не залежить ні від водної концентрації, ні від витрати пального.

Водне емульгування дизельного палива перед його розпиленням у факелі двигуна сприяє покращенню якості сумішоутворення в дизелі [13], але не виключає недоліків повітряного розпилення, а саме високого ступеня неоднорідності розмірів часток. У зв'язку із цим виникає завдання пошуку способу ефективного горіння важкого палива без його попереднього розпилення.

Із цією метою, розпилення палива, як первинний етап його перетворення пропонується замінити емульгуванням, а отриману ВПЕ після попереднього випару подавати в зону горіння факела в газовій фазі. Це приводить до утворення на виході ламінарного дифузійного факела, структура якого однорідна та не містить рідкої фази.

В [42] представлені результати досліджень горіння емульсії моторної олії SHELL 15-W40. Об'ємна концентрація води C_v становила 10-40 %. Приготовлені емульсії зберігали видиму стабільність протягом 2-3 тижнів при 15-18 °С, середній розмір водних включень d_v становив $\sim 1-1,5$ мкм.

Дослідження показали, що температура газів у фронті має слабо виражений максимум при вмісті води в емульсії 20-25 % і змінюється в межах 1750-1850 К. Залежність величини T від C_v представлена на рис. 1.3.

Тут можна визначити такі зони: 1 – зона перевищення тепловиділення (за рахунок виділення надлишкової кількості активних часток внаслідок попереднього випару ВПЕ) над кількістю теплоти на випар води; 2 – зона рівності надлишкового тепловиділення та кількості витрат теплоти на випар води; 3 – зона перевищення витрат теплоти на випар води над кількістю теплоти.

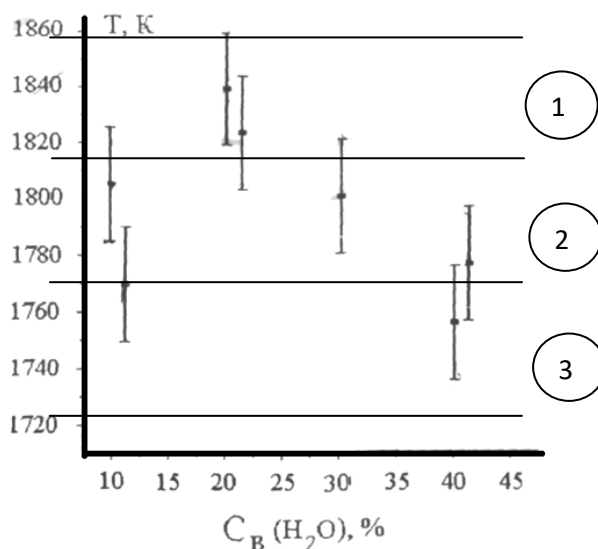


Рисунок 1.3 – Залежність температури у фронті факела T від вмісту води в емульсії C_v

Внаслідок перевищення теплоти, що виділяється в процесі спалювання ВПЕ з W^p у межах 10...25 % над кількістю теплоти, необхідної для випару води з емульсії, температура газів підвищується в порівнянні із спалюванням стандартного палива. При $W^p = 30$ % спостерігається рівність надлишкової теплоти, що виділяється при спалюванні ВПЕ, і витрат теплоти на випар води. Тому температура газів для ВПЕ з $W^p = 30$ % дорівнює температурі газів при спалюванні стандартного палива (зони 2 і 1).

Результати досліджень у ХФ НУК показують, що при водовмісті ВПЕ більше 30 % надлишкової теплоти, що виділяється, недостатньо для випару води і це є причиною зниження температури вихідних газів (зона 3, див. рис. 1.3). Отримані результати дещо відрізняються від даних [43], але загальним для зазначених робіт є наявність максимуму тепловиділення при горінні емульсії. При проведенні розрахункових досліджень техніко-економічних показників котлів при спалюванні ВМЕ необхідно враховувати дані по величині теплоти згоряння Q_n^p в залежності від водовмісту.

1.5 Активація передполум'яних процесів та промотування горіння розпиленого рідкого палива

В [25] експериментально досліджені передполум'яні процеси для краплі пиловугільномазутної суспензії на основі мазуту та дрібнодисперсного вугільного пилу, активованого модельними активаторами (NH_4NO_3 , NaNO_3 , NH_4Cl_4). Показано, що для реалізації горіння з високою повнотою згоряння необхідно застосувати додаткові заходи щодо активації робочого процесу. Фізичні основи активаційного підходу розглянуті в роботі [26].

Дія води, що утримується в емульсії, аналогічна дії на процес горіння речовин-активаторів. Загальна дія модельних активаторів, які знаходяться на поверхні часток вугілля та краплі води в мазуті, є причиною інтенсифікації горіння та зниження маси залишку. Вагому роль в активації передполум'яних

процесів суміші мазуту та дрібнодисперсного вугільного пилу має відповідна обробка мазутної емульсії.

У різних пристроях для спалювання палива завдяки рециркуляції у свіжу паливно-повітряну суміш підмішуються продукти згоряння. В експериментах з гомогенними паливно-повітряними сумішами вуглеводнів при незмінній температурі та попередньому введенні активних центрів горіння типу гідроксилу, атомів кисню й водню спостерігалось покращення та прискорення процесів горіння: скорочувалася затримка самозапалювання, ламінарна й турбулентна швидкості поширення полум'я збільшувалися, межі стабілізації й запалювання полум'я розширювалися [27].

Коли розглядається вплив підмішування до свіжої суміші продуктів згоряння, наприклад у результаті рециркуляції, у першу чергу приймається до уваги викликане цим підмішуванням підвищення температури. Різні конструктивні заходи, що зводяться до створення або збереження надлишкових концентрацій активних часток (зменшення часу перебування, усунення поверхонь, що сприяють рекомбінації), дозволяють використовувати й підсилювати ефект промотування.

1.6 Методи керування нестійким режимом горіння

Одним із перспективних варіантів є метод керування нестійким режимом горіння паливоповітряних сумішей, наведений у роботі [36]. У камеру згоряння ГТД направлявся модульований плазмотроном на резонансній частоті камери сильно нагрітий струмінь повітря, який подавався через форсункову голівку у протифазі до існуючих коливань тиску через фазообертаючий ланцюжок. При цьому фіксувалося зменшення на резонансній частоті амплітуди коливань тиску (до 10 дБ), а також спостерігалася стабілізуюча дія та немодульований струмінь плазмотрона, що викликано збільшенням уздовж струменя довжини зони горіння.

Із-за труднощів одержання стійкого запалення й горіння палива у форсажній камері за допомогою простих стабілізаторів можливе застосування форкамерних стабілізаторів полум'я. Форкамера являє собою мініатюрну КЗ, у якій створюється течія з малою швидкістю – порядку 10...20 м/с (рис. 1.4). Завдяки цьому забезпечується добре запалення палива й стійке горіння. Гарячий газ із форкамери подається в зони форсажної камери, де запалення й горіння палива утруднене [37].

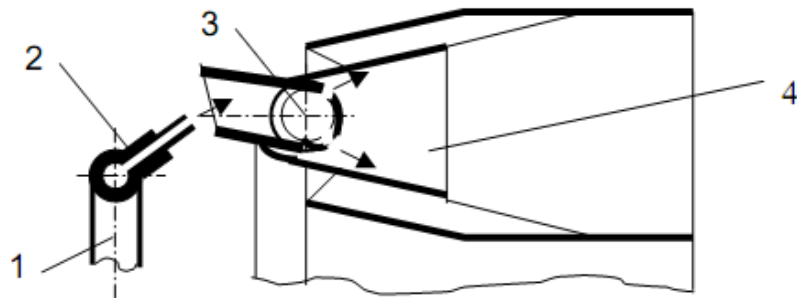


Рисунок 1.4 – Форкамерний стабілізатор полум'я:

1 - паливний колектор; 2 - паливна форсунка; 3 - карбюратор;
4 – форкамера

Спалювання кавітаційно-активованої ВПЕ забезпечує добре запалювання й стійке горіння бідних сумішей у КЗ внаслідок підведення надлишкової кількості активних часток.

У двопаливній камері згоряння компанії «Сіменс» застосування пальника та жарової труби більших розмірів дозволило істотно розширити границі зриву полум'я, знизити викиди NO_x до 9 ppm (але не значення α) і забезпечити стійкий процес горіння для частки пілотного палива $> 3 \%$ [3]. У випадку застосування в якості пілотного палива активованої ВПЕ ці границі можуть бути розширені.

Розвинена система придушення пульсацій використовувалася у повітряних і паливному трактах низькоемісійної камери згоряння ГТД [3] (рис. 1.5) з технологією попереднього змішування. Паливо та повітря попередньо змішують із одержанням однорідної суміші на вході в камеру, що створює

ідеальні умови для горіння з низькими викидами.

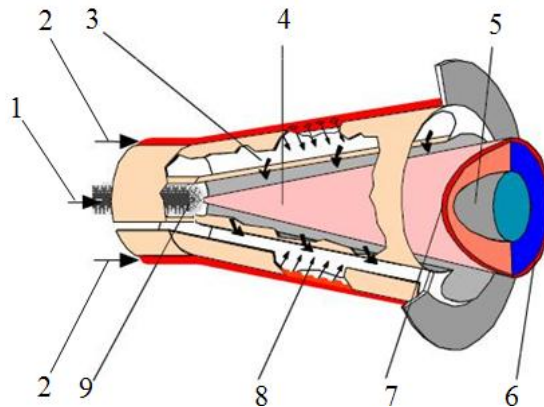


Рисунок 1.5 – Схема двопаливного пальникового пристрою фірми АВВ:

1 – рідке паливо; 2 – газ; 3 – щілинний канал підведення повітря; 4 – випар крапель рідкого палива; 5 – зона рециркуляції; 6 – фронт полум'я; 7 – запалення; 8 – отвори підведення газу; 9 – форсунка рідкого палива

Застосування активованої ВПЕ у двопаливних пальниках EV у камерах згорання ГТД типу GT-10, розроблених фірмою АВВ, з кільцевою жаровою трубою і 18-ю EV-пальниками з попереднім змішуванням дозволило реалізувати якісне запалення паливоповітряної суміші та стабілізацію фронту полум'я на всіх режимах роботи.

При організації горіння за принципом «багатого» та «бідного» у випадку застосування двопаливного пальника використання спалювання ВПЕ в «багатій» зоні забезпечить організацію стійкого горіння основного палива.

В [38] запропонована резонаторна фізична модель гасіння акустичної нестійкості в камерах згорання різних теплоенергетичних пристроїв. Вона реалізувалася шляхом впровадження низькокиплячих палив, мікрооб'єми яких ототожнюються з мікрорезонаторами. Показано переваги низькокиплячих добавок до основного палива, вплив яких полягає у тому, що вони «вибухаючи», значно покращують розпилювання основного рідкого палива в камерах згорання для забезпечення повноти його загорання. Сам же механізм гасіння акустичних коливань виражається в «усмоктуванні» хвильової енергії в мікрооб'єм пухирців-добавок при його резонансному режимі.

В роботі [39] показано, що нестійкість процесу горіння в камерах згоряння ДВЗ і рідкопаливних реактивних двигунів (РРД) носить ідентичний характер. Тому ті заходи, про які мова йде в роботі [38], стосуються усіх теплових двигунів (ДВЗ, ГТУ, РРД й ін.).

У багатьох дослідженнях роботи теплових двигунів не висувалися конкретні фізичні моделі процесів їх бездетонаційної роботи. Тобто аналіз роботи (стійкої або з наявністю детонаційних хвиль) проводився на основі експериментально-статистичних даних.

В роботі [40] наведені дані щодо введення низькокиплячих присадок, які виступають у ролі мікрорезонаторів. Розміри таких мікрорезонаторів-оглиначів повинні мати резонансний розмір, при якому частота їхньої пульсацій збігається із частотою акустичної енергії, що притікає. Тільки в цьому випадку вся хвильова енергія буде поглинається мікрорезонаторами [41].

Концентрація низькокиплячих присадок повинна по можливості бути такою, щоб вся акустична енергія була поглинена мікрорезонаторами. На думку авторів [40] такими присадками (добавками) повинні бути горючі речовини, що не знижують енергетичну ефективність роботи теплового двигуна.

Із роботи [41] відомо, що саме при резонансній частоті $\omega_{\text{рез}}$ мікрорезонатори, не взаємодіючи один з одним, «всмоктують» акустичну енергію з потоку рідини. Цей процес поглинання акустичної енергії відповідно до запропонованої моделі і відповідає стійкому режиму теплового двигуна.

Резонансна чистота (власна частота пухирця) при цьому знаходиться з виразу

$$V_{\text{рез}}^2 = \frac{C_p / C_p p_{\text{п}}}{0,33 \rho V_{\text{п}}^{2/3}},$$

де $p_{\text{п}}$ – тиск у пухирці; $V_{\text{п}}$ – його об'єм; ρ – густина рідини [41].

При $\omega < \omega_{\text{рез}}$ пухирці будуть розходитися, при $\omega > \omega_{\text{рез}}$ вони схлопуються, а за умов $\omega = \omega_{\text{рез}}$ – взагалі не взаємодіють. Потрібно вибрати останній варіант,

тому що пухирці-резонатори не зникають при схлопуванні, а працюють на усмоктування в себе акустичної енергії від динамічного потоку, що рухається в камері згоряння.

У якості неоднорідностей, які присутні в резонаторі, можуть бути використані пухирці пари, що утворюються при скипанні крапельок води ВПЕ, наявність яких приводить також до розширення сплесків акустичної енергії та хаотизації їхнього спектра, що дозволить погасити акустичну нестійкість.

Добавки високореакційних речовин у зону горіння, наприклад водню або кисню, істотно поліпшують стабілізацію горіння [42, 43]. Цей спосіб є привабливим через простоту конструктивного рішення фронтового пристрою камери згоряння. Незважаючи на те, що при його використанні зберігається необхідність в інтенсифікації розпилювання й сумішоутворення на пускових режимах, а також існують проблеми джерела високореакційного газу, цей спосіб варто розглядати як досить перспективний. Застосування активованої ВПЕ як добавки дозволяє усунути ці недоліки.

Більші можливості стабілізації горіння мають хімічні активні частки, що утворюються при реакціях горіння вуглеводневих палив і існують в їхніх продуктах згоряння протягом часу рекомбінації. При використанні їх як добавки до основної суміші спостерігалось розширення меж стабілізації й стійкості горіння [44].

Одним з перспективних методів підвищення стабільності робочого процесу є інтенсифікація спалювання вуглеводнів за допомогою низькотемпературної плазми. В [44] розглянутий реактор, у якому обмежена кількість електричної енергії використовується для стабілізації горіння паливоповітряної суміші, що безпосередньо контактує з електричною дугою (рис. 1.6). Недоліком його є відкладення на стінках реакційної камери продуктів термічного розкладання вуглеводнів і порушення внаслідок цього режимів стабілізації.

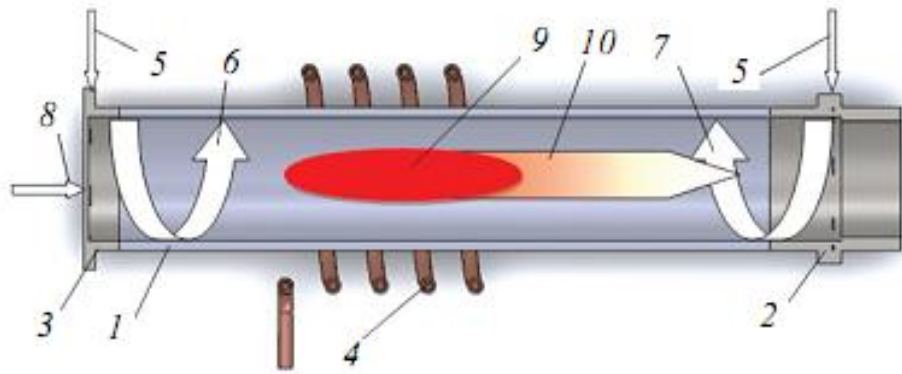


Рисунок 1.6 – Схема роботи високочастотного індукційного плазмотрона:
 1 – індукційна секція; 2 – вихідна секція; 3 – вхідна секція; 4 – мідна трубка;
 5 – плазмоутворюючий газ; 6 – прямий вихор; 7 – зворотний вихор; 8 – подача палива; 9 – плазма; 10 – плазмовий факел

Вхідна секція має завихрювач, через який у плазмотрон подається плазмоутворюючий газ 5 (аргон або повітря). Через отвори у вихідній секції можна подавати горючу суміш 8 або інше паливо (у тому числі й ВПЕ).

Детальний розгляд цього процесу показав, що використання важкого палива обумовлює наступне: збільшення часу випару краплі палива; зменшення дисперсності розпилю; збільшення яскравості полум'я; подовження факела; утворення сажі й коксового залишку, смолистих речовин при змішуванні важкого та пускового палив; термічне розкладання важкого палива у внутрішніх порожнинах форсунки; утворення відкладень від взаємодії палива й присадки.

Рішення проблеми повного спалювання залишкового палива може бути досягнуте на думку авторів [47] створенням камер згоряння збільшеного об'єму та застосуванням інтенсифікаторів процесу горіння.

Ефективним і практично прийнятним способом ініціювання й стабілізації горіння важких палив є підведення низькотемпературної плазми в зону утворення паливоповітряної суміші. Плазмовий факел дозволяє одержати велику кількість активних радикалів (H, CH, CH₃, O й ін.), які розподіляються рівномірно в робочій суміші, а також центр розгалужених ланцюгів.

Стабілізація горіння здійснюється завдяки швидкому розподілу радикалів у паливоповітряної суміші та утворення особливої гідродинамічної структури потоку.

Проблеми, що виникають при реалізації методу плазмового ініціювання, - створення працездатної в умовах високих температур і тисків конструкції плазмотрона, що має необхідний ресурс, розробка особливого джерела живлення плазмотрону – практично вирішені науковим колективом на кафедрі суднових парових і газових турбін Миколаївського кораблебудівного інституту [45]. Проведення дослідження на стендах і випробування плазмової системи ініціювання на натурних ГТД авіаційного типу показали прийнятність даного методу і його перспективність.

Подальший перехід на застосування в судновому газотурбобудуванні більш важких палив – флотських мазутів Ф5, Ф12, моторного палива ДМ – приведе до нових проблем використання форсунок, працездатність і якість яких істотно визначаються фізико-хімічними властивостями палива. У цьому зв'язку доцільно розглядати інші можливості отримання високої дисперсності палива, що подається в камеру і його інтенсивного перемішування з первинним повітрям.

Тут в якості перспективного варіанту можна розглядати фронтовий пристрій з двома реєстрами, що забезпечують одночасно розпилювання палива й стабілізацію фронту полум'я [48]. Такий пристрій в [47] був названий безфорсунковим фронтовим пристроєм. Він складається з прийомного патрубку 2, равлика 3, паливоповітряного (центрального) 6 і повітряного (периферійного) 5 завихрювачей і вихідного дифузору 4 (рис. 1.7).

Підведене по трубки 1 паливо подається в приймальний патрубок, звідки разом з повітрям надходить у равлик. Тут воно перемішується з паливоповітряною сумішшю і повітрям, надходить у лопатковий апарат центрального завихрювача, де отримує тангенціальне закручення. Такий пристрій є доцільним при використанні ВПЕ, що підтверджується результатами досліджень, де забезпечує стаціонарне горіння попередньо випаруваної

емульсії.

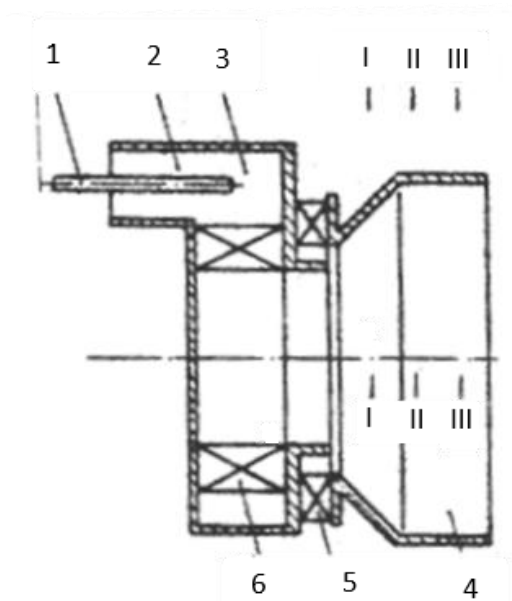


Рисунок 1.7 – Схема фронтового безфорсункового пристрою:

I, II, III – перетини вимірів параметра потоку

Реакції, що спостерігаються в процесі змішуванні низькотемпературної плазми з паливом в камері плазмохімічного реактора або на поверхні закрученого плазмового струменя, приводять за певних умов до утворення надрівноважних концентрацій атомів і радикалів (H , CH_3 , O , OH й ін.) і значних обсягів продуктів неповного перетворення C і H_2 . Продукти реакцій, що знаходяться в зоні контакту плазми з частиною палива, швидко дифундують в область основної паливоповітряної суміші і там сприяють промотуванню її горіння.

Можливо використовувати явища, що спостерігалися при форкамерно-факельній організації горіння з високою хімічною активністю, що полягають у залученні продуктів неповного згорання багатих горючих сумішей. Висока реакційна здатність продуктів форкамерного факела викликає зменшення часу затримки запалення, збільшення швидкості й повноти вигорання основного палива, розширення меж роботи камери згорання. Аналіз процесів самозапалювання метану, H -бутану, ізооктану і H -гептану в турбулентному потоці при атмосферному тиску при температурах 823-1423 К показав, що час

затримки запалення зазначених вище газів у присутності продуктів неповного згоряння скорочується більш ніж на порядок при одній і той же температурі, а у випадку однакового часу затримки спостерігається зменшення температури запалення майже у два рази.

Аналогічні дослідження, проведені з розпиленими рідкими паливами – гасом і цетаном – показали, що ефект промотування проявляється тут так само, як і при горінні гомогенних сумішей [46].

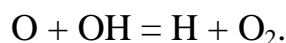
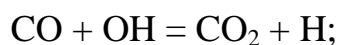
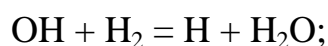
Дослідження впливу активних продуктів на швидкість поширення полум'я гасу й повноту згоряння в модельній камері дозволило встановити збільшення турбулентної швидкості поширення полум'я, скорочення довжини зони горіння й збільшення сумарної повноти згоряння при зростанні концентрації активних часток у потоці [47].

Розгляд і розрахунки кінетики високотемпературного горіння метану в плазмовому повітряному струменю у припущенні миттєвого змішування потоків без втрат повного тиску та ентальпій дозволили зробити висновок про сильну залежність концентрацій атомарного водню від початкової температури плазми та часу перебування палива в плазмохімічному реакторі. Так, при температурі плазми $T_{пл} = 3000$ К максимальну концентрацію атомів водню Н забезпечують суміші з $\alpha = 0,6-0,7$ при часі перебування $\tau = 5 \cdot 10^{-6}$ с, а у випадку $\alpha = 0,1$ – при $\tau = 8 \cdot 10^{-4}$ с. Нижче наведені основні реакції, що приводять до надрівноважних концентрацій атомів водню у випадку плазмохімічної реакції:



де М – будь-який компонент реагуючої системи.

При $\alpha > 0,4$ мають місце реакції:



Експериментальні дослідження сумарної концентрації активних часток у факелі плазмохімічного генератора (паливо-гас) дозволили авторам роботи [45] зробити висновок, що при $\alpha = 0,4-0,7$ концентрація активних часток сильно залежить від часу перебування суміші в реакторі.

Вплив активних продуктів реактора на вигорання бідних паливоповітряних сумішей вище, ніж збагачених. Так, додавання 5 % продуктів реактора в основну горючу суміш із $\alpha = 1,1$ і 0,8 приводить до більш швидкого вигорання палива при $\alpha = 1,1$. Подальше збільшення добавок активних продуктів до 15 % незначно прискорює спалювання основного палива.

З кінетичних розрахунків також видно істотний вплив добавок продуктів реактора на час затримки запалення й величину гаданої енергії активації стехіометричних горючих сумішей. При температурі в зоні змішування потоків 1600 К добавки до 15 % скорочують час затримки запалення сумішей майже на порядок, енергія активації зменшується приблизно на 15-25 %.

У цілому на підставі наявних даних можна відзначити, що в результаті плазмохімічних реакцій, що відбуваються при взаємодії повітряної плазми з вуглеводневим паливом, утворюється високотурбулентний плазмово-паливний факел, що має більші надрівноважні кількості активних у хімічному відношенні продуктів і високу температуру. Цей факел безпосередньо й опосередковано сприяє інтенсифікації процесу горіння основної бідної паливоповітряної суміші, знижуючи величину її енергії активації та підвищуючи повноту і швидкість вигорання палива.

Висновки до розділу 1

1. Використання емульсованого палива позитивно впливає на якість робочих процесів в камерах згорання двигунів та топкових камерах котельних установок. Водопаливні емульсії на основі вуглеводневого палива є багатокомпонентними хімічними системами, характеристики горіння яких не

систематизовані.

2. В останній час надається перевага спалюванню попередньо перемішаної бідної паливо-повітряної суміші, що дає змогу знизити утворення термічних оксидів азоту. Упорскування водяної пари на стадіях подачі та горіння паливно-повітряної суміші сприяє стійкості процесу та дозволяє усунути вібраційне горіння. Кількість пари, необхідної для придушення вібраційного горіння, залежить від амплітуди акустичних коливань і частки палива в суміші. Найбільш ефективною для усунення вібраційного горіння є подача пари по центру рециркуляційної зони стабілізатора полум'я.

3. Проведені експериментальні дослідження показують, що більш висока ефективність процесу горіння спостерігається при спалюванні ВПЕ у порівнянні з уведенням води та водяної пари у зону горіння. Попереднє окислювання вуглеводнів емульсії збільшує швидкість і повноту згоряння палива.

4. Проаналізовано вплив якості води як складової водопаливної емульсії на ефективність роботи енергетичних установок та методи її попередньої обробки. До найбільш ефективних методів відносять електрохімічну обробку в електролізері та озонування.

5. Доведено, що для реалізації процесу повного горіння ВПЕ необхідно застосувати додаткові заходи активації робочого процесу. При цьому дія води в емульсії є аналогічною дії на процес горіння речовин-активаторів.

6. Розглянуті методи керування нестійким режимом горіння паливоповітряних сумішей. Показано, що спалювання кавітаційно активованої ВПЕ забезпечить якісне запалення й стійке горіння бідних сумішей внаслідок підведення надлишкової кількості активних часток. В якості перспективного можливо розглядати метод підвищення стабільності робочого процесу за допомогою низькотемпературної плазми.

7. Використання попереднього змішування та випару ВПЕ дозволить реалізувати своєчасне запалення паливоповітряної суміші та стабілізацію фронту полум'я на всіх режимах роботи енергетичних установок.

РОЗДІЛ 2. ТЕРМОАКУСТИЧНІ ПРОЦЕСИ У КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПОПЕРЕДНЬО ПІДГОТОВЛЕНОЇ ВПЕ

2.1 Процес виникнення коливань при горінні паливних сумішей

Процес осцилюючих коливань потоку газів починається при горінні водомазутної емульсії (ВМЕ) внаслідок мікрровибухів її крапель, тому теоретичні дослідження термоакустичних процесів у камері згоряння при використанні попередньо підготовленої емульсії необхідно розглядати, починаючи з механізму фазових перетворень.

Прийнято класифікувати нестійкість горіння по частоті виникаючих коливань. Низькочастотна нестійкість характеризується тим, що довжина хвилі коливань набагато більше розмірів, властивих камері згоряння й системи подачі, так що енергетичну установку або двигун можна розглядати як сукупність інерційних і пружних елементів. Хвильові властивості камери тут не грають ніякої ролі, тому її можна вважати акустичною ємністю. Для усунення низькочастотної нестійкості рекомендується збільшення наступних характеристик: перепаду тиску на форсунках, об'єму камери згоряння, співвідношення довжин трубопроводів подачі до їх діаметрів.

Найнебезпечнішою є високочастотна (акустична) нестійкість горіння. Частота коливань відповідає однієї із власних частот камери згоряння як акустичного резонатора. Спостерігаються поздовжні й поперечні (радіальні, тангенціальні) коливання з високими частотами, тому вплив системи подачі звичайно не враховують. На появу цього типу нестійкості впливають наступні основні фактори: запізнювання запалення, зміна часу підготовчих процесів, швидкість хімічних реакцій під впливом коливань тиску й температури. Для усунення високочастотних коливань рекомендується оснащувати форсункову голівку протипульсаційними перегородками, упорскувати більш леткий компонент із підвищеною швидкістю, підсилювати поглинання акустичної енергії на стінках камери згоряння шляхом відповідного облицювання або

установки поглиначів, що діють за принципом резонатора Гельмгольца, а також шляхом введення твердих часток у продукти згоряння.

У великих камерах згоряння частоти власних коливань не такі великі, тому хвильові властивості системи подачі можуть відігравати істотну роль, тобто тут мова йде про нестійкість на проміжних частотах.

У форсажній камері двигуна можуть збуджуватися поздовжні коливання, що пов'язано з неякісним сумішоутворенням, що відповідає мікрровибухам крапель ВМЕ [34]. Для форсажних камер характерні високі частоти коливань до 3000 Гц.

За певних умов, що залежать від складу горючої суміші, швидкості обтікання стабілізатора, його форми та розмірів, відбувається самозбудження звукових коливань із частотою, близькою до однієї із власних частот коливань газу в каналі [48, 49].

З викладених вище результатів проведених різними вченими експериментальних досліджень можливо зробити такі висновки:

1. Процес виникнення акустичних коливань газу відбувається мимовільно, отже, вібраційне горіння – це автоколивальне явище.

2. Самозбудження звуку спостерігається в установках, де відбувається процес горіння при наявності явища передачі тепла від стінок та нагрітих тіл, які знаходяться в об'ємі газу.

3. Процес виникнення акустичних коливань починається з утворення нескінченно малих збурювань, далі відбувається зростання їх амплітуди, поки коливання не приймуть сталий характер. У цьому випадку річ йде про «м'який» режим вібраційного горіння. Нестійкість горіння у камерах згоряння двигунів у більшості випадків з'являється після початкового кінцевого імпульсу тиску, що виникає при запуску двигуна. Це – так званий «твердий» режим автоколивань [1].

4. Вібраційне горіння в камерах згоряння напружених енергетичних установок – небажане явище, що вимагає розробки спеціальних заходів для його усунення.

Виникнення коливань у суцільних середовищах може інтенсифікувати ряд процесів, що відбуваються в енергетичних установках. Відомо, що в коливних потоках відбувається істотне прискорення різних тепломасообмінних процесів (сумішоутворення, випару та ін.) [50], покращується агломерація часток і коагуляція аерозолів; інтенсифікуються процеси адсорбції та десорбції [51]. При вібраційному горінні, крім того, відбувається збільшення теплонапруженості топкового об'єму, поліпшення повноти згоряння палива в порівнянні з рівномірним режимом горіння [52].

Термодинамічні коливання можуть генеруватися в пристрої, що складається з ємності та вузької труби, довжина якої набагато менше довжини звукової хвилі (резонатор Гельмгольца). Такому пристрою відповідає камера згоряння та газохід установки, у якій спалюється ВМЕ. Самозбудження коливань пов'язане з різницею температури стінок ємності й горла, причому градієнт температури на вході в горло повинен бути вище деякого мінімального значення. Ефект спостерігається, якщо середня швидкість руху газів у трубі змінюється в деякому інтервалі, а потужність теплового джерела вище певного граничного значення [53].

2.2 Основні теоретичні підходи до вивчення термоакустичних коливань

Першим припущення щодо того, що явище акустичних коливань підтримується у випадку, якщо максимальна кількість теплоти передається коливному газу під час його максимального стиску, висловив Релей. Математичне обґрунтували цієї гіпотези здійснили Патне і Деннис [54, 55]. У тому випадку, коли фазове зрушення між коливаннями тиску та швидкості підведення теплоти за своїм абсолютним значенням менше $\pi/2$, відбувається збудження коливання. Якщо ж фазове зрушення лежить в інтервалі $\pi/2 \dots \pi$, то відбувається гасіння коливань.

В роботі [56] представлені результати теоретичних досліджень нестійкості горіння в двигунах. Показано, що також для цього випадку дійсним є критерій Релея, але тут враховується швидкість виділення газоподібних продуктів згоряння, а не швидкість виділення теплоти.

Основна проблема при вивченні явища автоколивань в процесі горіння – це складність їх математичного опису. Головна причина цього – нелінійність властивостей процесу горіння, що пов'язано з необхідністю вирішення нелінійних рівнянь в частинних похідних.. Зворотний зв'язок відіграє ключову роль, але його опис також ускладнений через нелінійність. Навіть якщо спростити завдання до лінійної постановки, розв'язання рівнянь все одно залишається дуже складним.

Був виконаний аналіз умов порушення вібраційного горіння за умов спалювання газоподібного та рідкого палив в пристроях типу резонатора Гельмгольца [57]. При виникненні низькочастотної нестабільності горіння коливальна система складається з пружного об'єму (камери згоряння), інерційної ланки (системи подачі) та зосередженої ланки, що описує витікання газу із сопла. Для такої моделі важливо, щоб розміри цих елементів були значно меншими за довжину хвилі коливань, що виникають.

У випадку внутрішньокамерної нестійкості використовується модель чутливого часу запізнювання, а система подачі при моделюванні не враховується. Важливою особливістю вивчення вібраційного горіння в зосереджених системах є те, що їх поведінку можна описати за допомогою звичайних диференціальних рівнянь. Це дозволяє використовувати потужні інструменти теорії автоматичного регулювання для аналізу умов, за яких починаються коливання [58].

Використання енергетичного методу дає змогу більш детально пояснити фізичні процеси, наслідком яких є поява самозбудження коливань, та визначити критерії нестійкості [59]. Цей метод виявився дуже корисним для вирішення

складних задач у теорії вібраційного горіння, де присутні нелінійні залежності. Саме завдяки ньому вдалося математично обґрунтувати критерій Релея.

Посилення незначних акустичних коливань в газі відбувається у тому випадку, коли спостерігається перевищення втрат акустичної енергії A_d над енергією, згенерованою в процесі горіння A_c . Границя нестійкості настає, коли ці дві величини зрівнюються, тобто $A_c = A_d$. Коливання швидкості тепловиділення на початковій стадії прямо пропорційні збуренням тиску або швидкості потоку. Наявність різниці між енергією, що генерується, і втратами $A_c - A_d$ викликає зростання амплітуди коливань газу. Однак через нелінійність властивостей процесу горіння можна говорити про сповільнення зростання амплітуди зміни швидкості виділення теплоти. Також зростають і втрати акустичної енергії, викликані звуковим випромінюванням з камери згоряння та в'язкісними характеристиками газу. Зближення величин енергії, що генерується, і втрат A_c і A_d , а також повторне досягнення рівності означає, що досягнуто стабільне значення амплітуди коливань. Умова $A_c = A_d$ була успішно використана при проведенні аналізу стійкості в трубці Рійке, резонаторі Гельмгольца та установці Зондхауса [59, 60].

2.3. Особливості процесу мікровибуху краплі водопаливної емульсії

Відомо, що процес нагрівання краплі водопаливної емульсії при атмосферному тиску супроводжується стрибкоподібною зміною їхнього діаметра в 1,5-2 рази, відривом від основної маси палива дрібних часточок, а іноді й дробленням вихідної краплі. Зазначені особливості поведінки краплі є наслідком мікровибухів, що відбуваються при зміні фазового стану води, яка перебуває в паливі у вигляді об'ємних включень. Практичний інтерес представляє визначення температур, при яких скипає вода в умовах краплі ВПЕ.

Вода, що присутня у краплях палива, може перебувати в перегрітому

стані. Ступінь перегріву визначається величинами об'ємного газовмісту води α і радіусу краплі води R_v .

В [27, 28] відзначено, що найбільший позитивний ефект, що полягає в інтенсифікації горіння за рахунок вторинного розпилення палива, спостерігається при наявності у факелі значної кількості великих крапель. У випадку $R_k > R_v$ у великих краплях палива можуть перебувати більші за об'ємом включення води. Температура початку процесу фазових перетворень води зменшується з ростом R_v . Руйнування вихідної краплі стає можливим тоді, коли кінетична енергія E , що виділяється при мікрровибуху об'єму води, перевищить енергію, обумовлену дією поверхневих сил. У наближенні Релея величина $E = 2\pi r \dot{R}^2 \cdot R^3$ пропорційна густині води ρ , квадрату швидкості росту порожнини \dot{R} і її об'єму R^3 .

Експериментально встановлено, що краплі водопаливної емульсії за інших рівних умов запалюються швидше звичайного безводного палива [61]. Основна причина цього ефекту – додаткове дроблення вихідних крапель емульсії внаслідок мікрровибухів. Для досить великих крапель із діаметром $d > 10^{-4}$ м механізм утворення конкурентної фази при перегріві носить гетерогенний характер, тобто зародками кипіння є парогазові порожнини, наявні в сферичних включеннях води. Для реальних топкових процесів характерна присутність у факелі крапель різного розміру. У цьому зв'язку становить практичний інтерес аналіз процесу нагрівання й умов фазових перетворень води в краплях емульсії при $5 \cdot 10^{-6} \leq d_k \leq 1 \cdot 10^{-3}$ м.

У даній роботі наведені результати дослідження процесів, що протікають у краплях водопаливної емульсії від початку їхнього нагрівання до запалення. Нагрівання емульсії супроводжується вибухподібним скипанням води, причому конкурентна фаза може розвиватися як за гетерогенною, так і за гомогенною схемами.

Аналізуючи дані [62], можна визначити, що при фіксованій температурі

поверхні мікрровибухи будуть відбуватися в першу чергу в краплях великого діаметра з більшим вологовмістом тому, що ймовірність присутності в них нестійких зародків кипіння більше. У малих краплях емульсії випар води відбувається при більш високих температурах. Це може привести до якісного розходження в запаленні крапель різного масштабу, що складається в тому, що малі краплі здатні запалюватися до моменту утворення в них конкурентної фази.

При $T_c > 750$ °C краплі води запалюються відразу після скипання газового середовища води, а для $T_c < 750$ °C є характерним зростання затримки запалення. При водовмісті $W^p > 0,1$ вода в емульсії впливає на теплоємність і теплопровідність краплі, приводячи до їхнього зростання в порівнянні з безводним паливом, що спричиняє збільшення часу прогріву. При водовмісті $W^p < 0,05$ теплоємність і теплопровідність емульсії близькі до відповідних значень для безводного палива, але зменшення водовмісту приводить до росту температури фазового переходу внаслідок дефіциту центрів пароутворення.

Для практики становить певний інтерес порівняння періодів попереднього прогріву до запалення крапель безводного палива та емульсії. Експерименти в цьому напрямку проводилися при $d = (1...2) \cdot 10^{-3}$ м і показали, що такі краплі емульсії запалюються швидше звичайного палива. Крім того, при експлуатації котлів на ВПЕ [63] спостерігалася інтенсифікація горіння тільки при відносно погано організованих процесах розпилення рідкого палива. Час початкового прогріву нерухомої краплі до запалення можливо умовно розділити на три періоди: попередній прогрів τ_n , попередній випар τ_v і хімічна індукція τ_x , при цьому величина $(\tau_n + \tau_v)$ пропорційна квадрату діаметра краплі, а τ_x визначається лише сортом палива й температурою зовнішнього середовища. Якщо обводнена крапля запалюється до моменту настання фазових перетворень води, то процес є подібним до запалення безводного палива. У протилежному випадку період початкового прогріву в першому наближенні можливо представити так: нагрівання краплі емульсії до фазових переходів

вода-пара τ_k , викид дрібних часток палива або розпад вихідної краплі, подальший прогрів і попередній випар знов утворених обсягів палива плюс період хімічної індукції τ_x .

Слід зазначити, що в розглянутій схемі значними є тільки періоди нагрівання до фазових перетворень і хімічної індукції. Скипання води носить вибухоподібний характер, а прогриваються й випаровуються дрібні краплі, що утворилися в результаті мікробибуху, значно швидше великих.

Таким чином, оцінку періоду запалення краплі емульсії можливо одержати, порівнюючи τ_k для емульсії з величиною $(\tau_n + \tau_x)$ для безводного палива. Значення τ_k можна одержати теоретично по методиці [62], а характеристику запалення K – з емпіричної залежності [64]:

$$K = d^2/(\tau_n + \tau_x).$$

При сталості T_c рівняння виду $\tau_k(d, T_c, \varphi) = d^2/K$ зв'язує розмір краплі із вологовмістом. Позитивний ефект у плані прискорення запалення при використанні ВПЕ варто очікувати тільки для досить великих крапель, отриманими при тривалій експлуатації цілого ряду парових котлів.

2.4 Дослідження вібраційного режиму горіння водопаливної емульсії для підвищення показників ефективності енергетичної установки

Дослідження термоакустичних процесів у камерах згоряння при використанні водопаливної емульсії (ВПЕ) є важливим для розуміння та оптимізації ефективності спалювання палива. Для дослідження термоакустичних процесів широко використовуються експериментальні установки, що складаються з контейнера і вузької труби, довжина якої є значно меншою за довжину звукової хвилі – резонатор Гельмгольца.

Самозбудження коливань пов'язане з різницею температур між стінками

ємності і горлом, а градієнт температури на вході в горло повинен перевищувати певне мінімальне значення. Найбільш інтенсивний звук термоакустичних коливань спостерігається, коли джерело тепла знаходиться на відстані чверті довжини труби від нижнього кінця. Ефект спостерігається при зміні середньої швидкості руху газів в трубі в певному інтервалі, а також при перевищенні потужності джерела тепла певного граничного значення.

Коливання, що виникають у суцільних середовищах, можуть інтенсифікувати ряд процесів, що відбуваються на промислових підприємствах. Відомо, що коливальні потоки значно прискорюють різноманітні тепломасообмінні процеси (сумішоутворення, випаровування, теплообмін від газу до стінок, теплообмін при взаємодії потоку з нагрітими тілами тощо), покращують агрегацію частинок і коагуляцію аерозолі, інтенсифікують процеси адсорбції та десорбції [53, 65]. Вібратійне горіння також призводить до збільшення теплового напруження камери згоряння та покращення повноти згоряння палива порівняно з рівномірним режимом горіння. Камера згоряння резонатора Гельмгольца являє собою акустичну ємність, в якій газ періодично стискається і розріджується. Продукти згоряння здійснюють коливальний рух у резонансній трубці – «горлі» резонатора. Інші прилади цього типу та результати їх досліджень описані в [66]. Широко використовуються пристрої, що складаються з двох труб, одна з яких, ширша і коротша, є камерою згоряння, інша - резонансною. Одна з таких установок зображена на рис. 2.1.

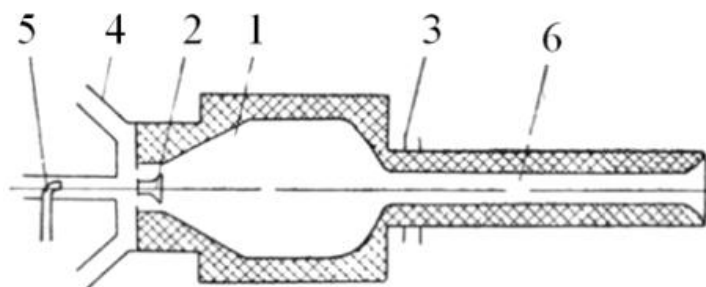


Рисунок 2.1 – Вібратійна камера згоряння: 1 – основна частина камери;
2 – стабілізатор; 3 – вхід вторинного повітря; 4 – первинний повітрозабірник;
5 – сопло; 6 – резонансна трубка

Наявність в потоці газу нагрітих тіл або нерівномірний нагрів зовнішньої сторони стінок труби викликає самозбудження акустичних коливань в трубці Рійке і нерівномірно нагрітому резонаторі Гельмгольца.

Якщо немає збурень потоку, процес теплопередачі буде стаціонарним. Періодична складова швидкості надходження тепла, необхідна для збудження коливань, обумовлена дією звукових коливань на теплообмін газу до нагрітого тіла або стінок труби. Наприклад, у трубці Рійке коливання швидкості потоку призводять до періодичної зміни швидкості тепловіддачі від нагрітого тіла. Модуль і фаза функції передачі залежать від числа Струхала Sh . Із збільшенням числа Струхала модуль функції передачі швидко зменшується, а фаза збільшується. Таким чином, флуктуації швидкості тепловіддачі відстають від флуктуацій швидкості потоку на кут C , який досягає граничного значення $\pi/2$ зі збільшенням числа Струхала. Оскільки процес теплообміну має певну інерційність, то при більших значеннях числа Sh нагріте тіло не встигає передати тепло, викликане коливаннями швидкості потоку, газу, тому амплітуда коливань швидкості теплообміну прагне до нуля.

Розглянемо полум'я в трубці, вхідний отвір якої закрито за винятком невеликого отвору для подачі заздалегідь приготовленої суміші пального газу та повітря. Дифузійні процеси були виключені з розгляду, оскільки повітряний потік через трубу відсутній. Газ у трубці резонатора створює акустичні коливання, це призведе до поширення звукових хвиль в подавальному трубопроводі, і процес надходження горючої суміші стане періодичним. Коливання швидкості потоку означають, що швидкість потоку суміші, а отже, і швидкість виділення тепла при горінні, також стануть періодичними.

У розглянутому випадку петля зворотного зв'язку має такий вигляд: коливання тиску в трубці резонатора – періодичні зміни витрати горючої суміші – коливання швидкості тепловиділення при горінні. Час затримки горіння залежить від складу суміші та діаметра вихідного отвору живильної труби. При зміні швидкості витікання фронт полум'я починає переміщатися в положення,

відповідне змінений швидкості потоку. Цей процес вимагає певного часу. З формальної точки зору процеси дифузії і теплообміну багато в чому ідентичні, і можна припустити, що час затримки дифузійного горіння змінюється в тих же межах, що і час запізнювання швидкості теплообміну в трубці Рійке [67].

На практиці часто зустрічаються ділянки, що звужуються, розширюються або викривлені ділянки, які розташовані вище за течією від зони горіння, а також слабо проточні елементи установки. У всіх цих випадках в потоці утворюються і поширюються вихори. У коливальному потоці утворення вихору буде періодичним. Спостереження показали, що з моменту свого зародження вихор деякий час зростає, після чого відривається і рухається за течією. Наступний вихор відривається через час, рівний періоду коливань швидкості потоку. Наявність стоячих хвиль в трубці призводить до виникнення вторинних течій – вихору Релея в ядрі потоку і вихору Шліхтінга в прикордонному шарі біля стінок.

За наявності середньої швидкості потоку ці вихори будуть заноситися потоком і взаємодіяти з процесом горіння. Наближаючись до фронту полум'я, кожен вихор деформує його, що призводить до зміни локальної швидкості поширення полум'я, а в кінцевому підсумку до зміни інтегральної (для всього полум'я) швидкості згоряння горючої суміші, а отже, і швидкості тепловиділення при горінні. Тому необхідно враховувати флуктуації швидкості на ділянці розділення вихорів. Час затримки швидкості тепловиділення складається з двох складових: часу руху вихору від перерізу відриву вихру до зони горіння і часу затримки горіння, пов'язаного зі зміною структури фронту полум'я при його деформації під дією вихору.

Дослідження [53] показали, що плоский фронт полум'я, розташований у потоці горючої суміші, здатний посилювати нескінченно малі збурення швидкості та тиску. Якщо полум'я помістити в резонаторну трубку, звукові коливання впливатимуть на фронт полум'я, змушуючи його періодично рухатися зі змінним прискоренням. Механізм зворотного зв'язку, заснований на

гідродинамічній нестійкості фронту полум'я, може бути таким – коливання швидкості потоку в трубці резонатора викликають прискорений рух полум'я. Фронт полум'я стає хвилеподібним, періодично змінюючи площу поверхні. Це призводить до коливань інтегральної швидкості горіння, тобто швидкості виділення тепла. Всі ці процеси є чутливими до зміни тиску в зоні горіння, а саме покращується якість розпилюваної краплі, підвищується швидкість сумішоутворення, прискорюються процеси випаровування і нагрівання краплі палива і окислювача. При досить великих амплітудах коливань тиску швидкість хімічних реакцій, що супроводжують процес горіння, зростає [50].

Розглянемо горіння рідкого палива в потоці повітря. Акустичні перешкоди викликають коливання витрати палива та швидкості повітряного потоку, що обтікає сопло. У цьому випадку можуть бути реалізовані механізми зворотного зв'язку потоку і дифузії. При досить високих тисках подачі палива, його витрату можна вважати постійною.

Припустимо, що сопло знаходиться в зоні, де коливання швидкості повітря незначні, наприклад, у «вузлі» швидкості стоячої звукової хвилі. Тоді обидва ці механізми зворотного зв'язку виключаються. З моменту виходу краплі палива з форсунки до повного згорання проходить певний час (час затримки), щоб паливо розпорошилося, нагрілося, випарувалося, змішалось з окислювачем і вступило в хімічні реакції. Ці процеси чутливі до коливань тиску, що призводить до зміни часу затримки горіння. Його зменшення супроводжується прискоренням згорання палива, тобто збільшенням швидкості виділення тепла. Збільшення часу розпилення призводить, навпаки, до зниження швидкості виділення тепла. Внаслідок цього процес тепловиділення стає періодичним і з'являється можливість самозбудження акустичних коливань. Отже, існує багато різних механізмів зворотного зв'язку, які призводять до періодичної подачі енергії коливальному газу. Це створює труднощі у визначенні причин вібраційного горіння. Крім того, механізм, який спочатку працював при невеликих акустичних збуреннях, може бути замінений

іншим, коли коливання стають настільки інтенсивними, що картина горіння стає зовсім іншою. Наприклад, при горінні за стабілізатором фронт полум'я спочатку має хвилеподібну структуру. Зі збільшенням амплітуди коливань виникають розриви, спостерігається періодичне утворення і відрив вихорів від стабілізатора. Подальше посилення коливань призводить до турбулентності потоку, горіння є об'ємним і відбувається в області, що оточує стабілізатор, і не має чітких меж.

2.5 Процес горіння окремих частинок вуглецю в акустично пульсуючому потоці

Акустичні коливання, що навмисно введені, або що виникають спонтанно в об'ємі камери, якщо вони організовані належним чином, призводять до значних покращень у процесі горіння. Підвищення інтенсивності теплоти, зменшення кількості незгорілого палива, зменшення виходу оксидів азоту і сажі, інтенсифікація теплообміну в теплоприймальному апараті є основними позитивними змінами, що спостерігаються при переході на пульсуючий режим.

У роботі [50] проаналізовані фізичні механізми, конкуренція яких призводить до немонотонної залежності ефективності флуктуацій газу від згоряння вуглецевої частинки. Джерелом акустичного поля в усіх дослідках був термоакустичний генератор – трубка Рійке. Усі дослідження проводилися з частинками активованого деревного вугілля (густина – 500 кг/м^3 , зольний залишок менше 1 % мас., виходу летких речовин не спостерігався).

На рис. 2.2 показана термограма горіння великої (~2,5 мм) вугільної частинки. У моменти, позначені стрілками, «вмикалися/вимикалися» пульсації. Було виявлено більш високий рівень температури горіння вугільної частки в акустично коливальному потоці. На термограмі також видно зменшення часу теплової релаксації частинки, що закономірно пов'язане з її горінням. Збільшення швидкості зміни температури під час перемикання чітко видно в

міру вигорання частинки.

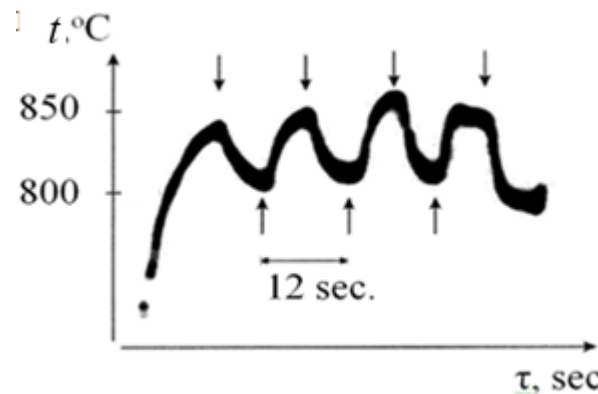


Рисунок 2.2 – Осцилограма зміни температури горіння великої частинки вугілля (2,5 мм) при вмиканні/вимкненні акустичних пульсацій

Виходячи з рис. 2.2, можна зробити висновок, що в механізмі інтенсифікації процесу горіння частинок за рахунок періодичного зносу газової області – фазові характеристики проміжного продукту реакції, визначальним параметром впливу буде не амплітуда взаємного зсуву частинка-газ, а співвідношення цієї амплітуди і розміру (діаметра) частинки. У результаті цей оператор був виведений як залежність виду

$$f(r) = \frac{1}{2r} \frac{A\omega}{\sqrt{\omega^2 + \left(\frac{9\eta}{2\rho_p r^2}\right)^2}},$$

де A – амплітуда зсуву; ω – частота; η – коефіцієнт динамічної в'язкості газу; ρ_p – густина матеріалу частинки; r – радіус частинки.

За наведеною формулою $f(r)$ отримано залежність (рис. 2.3) при $\omega = 2\pi \cdot 150 \text{ с}^{-1}$, $A = 800 \text{ мкм}$, $\rho_p = 500 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 50 \cdot 10^{-6} \text{ Па с}$ (повітря при 1273 К), що приблизно відповідає вищенаведеному експерименту. У цьому випадку $f(r)$ має максимум в області $2r = 50 \text{ мкм}$. Також було проаналізовано частотну залежність цього механізму впливу пульсацій потоку на горіння частинок. Уявлення про частотний ефект виходить із залежності амплітуди відносного

зсуву частинки-газу від частоти, тобто функції $f(\omega)$. Важливо, який з параметрів коливаль, амплітуда зсуву A або амплітуда коливаль швидкості $V_a = A \cdot \omega$ (тиск), буде фіксованим при зміні частоти. Залежність $f(\omega)$ при фіксованому радіусі частинки r , що відповідає цим двом випадкам, наведена на рис. 2.4, а, б.

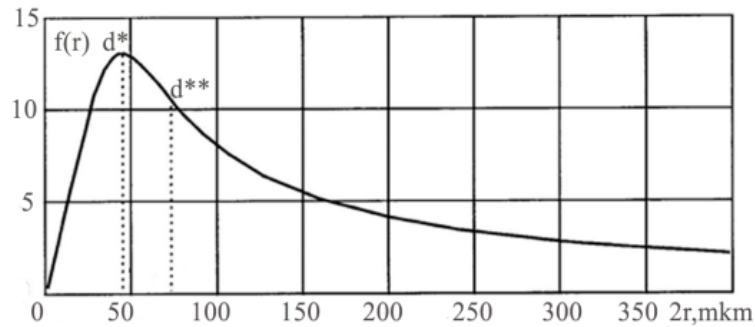


Рисунок 2.3 – Відносна величина амплітуди взаємного зсуву частинки-газ як функція розміру частинки

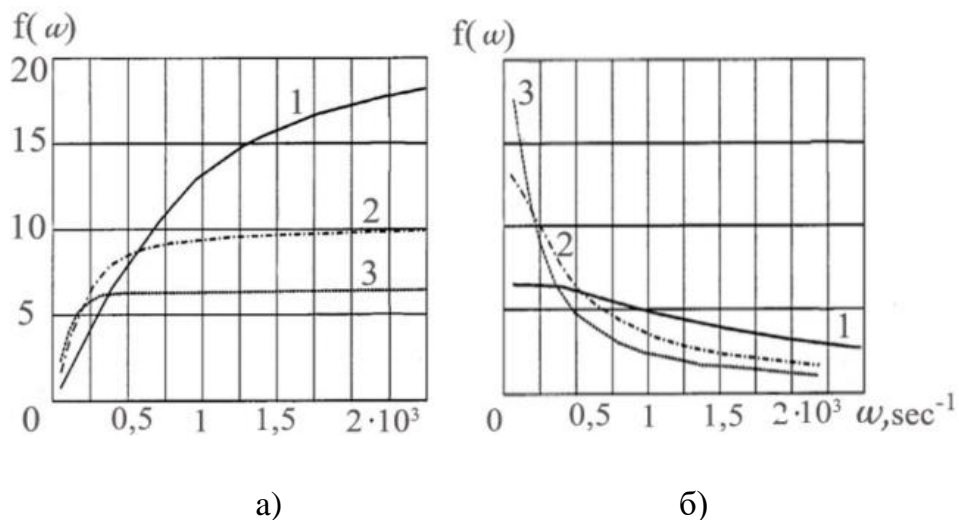


Рисунок 2.4 – Частотні залежності відносної амплітуди взаємного зсуву частинок і газу при фіксованій амплітуді зсуву (а) і при фіксованій амплітуді коливаль швидкості (б) в акустичній хвилі (криві відповідають частинкам діаметром 40 мкм (1), 80 мкм (2) і 120 мкм (3))

При постійній амплітуді зміщення A зі збільшенням частоти ступінь участі частинок у коливаннях зменшується, тому $f(\omega)$ асимптотично зростає до значення $A/(2r)$. При фіксованій амплітуді коливаль зі швидкістю V_a графік $f(\omega)$

спадає зі збільшенням частоти.

За результатами досліджень та оцінки впливу пульсацій потоку на горіння одиничних частинок вуглецю можна зробити наступні основні висновки:

- пульсації акустичного потоку призводять до інтенсифікації горіння одиничних вуглецевих частинок у всьому досліджуваному діапазоні їх діаметра (35-3500 мкм);

- наявність максимуму на залежності амплітуди взаємного зсуву частинка-газ від d можна пояснити, якщо врахувати значну роль зношування зони газофазної реакції C в області частинки.

Конкуренція двох факторів: залежності ступеня участі частинки в коливальному русі і залежності відносної величини відносного зміщення частинки і газу від розміру частинки зумовлює появу максимуму на залежності $\varepsilon(d)$. Оцінки, засновані на цих представленнях, добре корелюють з експериментальними результатами.

2.6 Механізми фазових перетворень у краплях водо-паливної емульсії

Процес мікровибуху крапель визначається об'ємним вмістом води в паливі та дисперсністю емульсії. Наявність мікроскопічних включень води в стандартному рідкому паливі принципово змінює процес займання в камерах згоряння розпиленої краплі. При певному ступені нагрівання водяні включення збільшують свій об'єм за рахунок утворення конкурентної парової фази, руйнуючи вихідну краплю палива на більш дрібні фрагменти, що сприятливо впливає на процес горіння. Таким чином, основний позитивний ефект від присутності води зумовлений зміною її фазового стану. У зв'язку з цим дослідження процесів, що передують займанню краплі емульсії, представляється актуальним як з теоретичної, так і з практичної точки зору.

Формування конкурентної фази при перегріві води може відбуватися за двома різними схемами гомогенною та гетерогенною. Гомогенна схема конкурентного фазоутворення застосовна до чистих рідин, оскільки передбачає порушення цілісності за рахунок забезпечення умов, за яких дві сусідні молекули можуть перебувати на відстані, що приблизно вдвічі і більше перевищує їх ефективні діаметри. Для кожної рідини існують чітко визначені температури, при яких відбувається порушення цілісності. Усі реальні рідини, включно з водою, на практиці демонструють значно нижчу межу міцності на розрив через те, що вони не є суцільними середовищами. У дистильованій воді, яка піддається спеціальній обробці під високим тиском і багатоступеневій фільтрації, з причин, які на даний момент не зовсім зрозумілі, ядра конкурентної фази продовжують існувати у вигляді мікропорожнин, заповнених водяною парою і газами, головним чином повітрям.

Теплофізична модель процесів базується на гетерогенній схемі конкурентної фази в перегрітій воді, яка передбачає наявність зародків у вигляді парогазових мікропорожнин, які при певній критичній температурі $T_{кр}$ втрачають стійкість і починають збільшувати свій об'єм за рахунок інтенсивного випаровування в них водяної пари. Методологія вимірювання концентрації зародків конкурентної фази та їх розподілу за розмірами базується на аналізі імпульсного акустичного випромінювання, що супроводжує вибух, що формує ріст зародків у перегрітій воді.

Для дослідження перетворень у краплях водопаливної емульсії розроблено модель термоакустичної установки, яка представлена на рис. 2.5 і складається з термостата 1 і резервуара допоміжного охолодження 2, заповненого синтетичним маслом SAE 25W/50 (API CG-4/SJ), призначеним для використання у високооборотних турбодизелях [69].

Масло мало температуру спінювання близько 395 °C і середню густину 853 кг/м³. Термостат містив плоский електронагрівач з живленням від регульованого джерела постійного струму 3, який забезпечував стабілізацію

заданої температури масла в термостаті.

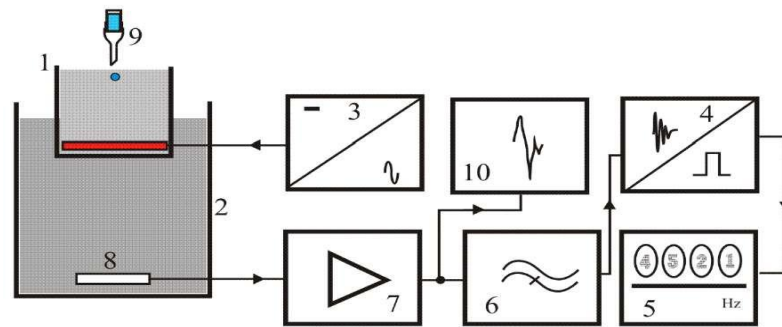


Рисунок 2.5 – Структурна схема дослідної установки: 1 – термостат; 2 – охолоджувач; 3 – джерело; 4 – перетворювач; 5 – цифровий частотомір; 6 – фільтр нижніх частот; 7 – підсилювач; 8 – п'єзоелемент; 9 – пристрій для подавання палива; 10 – осцилограф

Для запобігання перегріву вище точки Кюрі на дно допоміжної посудини поміщали акустичний п'єзокерамічний широкополосний гідрофон (п'єзокерамічний ПЗТ-10) у вигляді циліндричної пластини товщиною 1 мм і діаметром $5 \cdot 10^{-2}$ м. Перед початком вимірювань за допомогою механічної мішалки, що працює в режимі бульбашкової гідродинамічної кавітації, готували допалювальну емульсію заданої водності та дисперсності. Дозатор 9 генерував краплю емульсії в термостат, температура змінювалася з інтервалом $\Delta T \equiv 10^\circ$. Вона могла змінюватись від $T_{\min} = 387$ К до $T_{\max} = 570$ К. Нагрівання емульсії супроводжувалося кипінням мікрооб'ємів води, що містили зародки конкурентної фази з розмірами, рівними або перевищуючими критичну температуру. Утворення вибуху та зміна фазового стану води супроводжувалися генерацією акустичного імпульсу, що описується наступним рівнянням:

$$P_A^{(t)} = P_{A(\max)} \cdot \exp(-k_A \cdot \tau) \cdot \sin(\omega \tau + \psi),$$

де τ – поточний час, k – постійна загасання, ω – циклічна частота, ψ – початкова фаза.

Слід зазначити, що експоненціальне затухаюче коливання з періодом близько 10^{-4} с обумовлено резонансним збудженням термостата і допоміжної ємності. Короткий імпульс, викликаний мікробухом мікрооб'єму води, збуджує радіальні коливання циліндричної поверхні термостата і допоміжної ємності. Акустичний імпульс, перетворений п'єзоелементом 8 в електричну напругу, посилювався широкосмуговим підсилювачем 7 і подавався на фільтр низьких частот 6 для придушення низькочастотних структурних перешкод і на вхід запам'ятовуючого осцилографа 10. Перетворювач 4 служив тригерним перетворювачем експоненціально затухаючих імпульсів із заповненням у прямокутні імпульси короткої тривалості і великої крутизни фронтів. Кількість імпульсів реєстрував цифровий частотомір 5.

В об'ємі краплі по її радіусу буде існувати градієнт температури з максимумом на поверхні. Частинки води, які знаходяться в приповерхневому шарі краплі емульсії, зазнають фазових перетворень. Спостерігатиметься поверхнєве кипіння початкової краплі, що супроводжується ефектом розбризкування. У результаті багаторазових мікробухів у приповерхневому шарі з об'єму краплі будуть викидатися дрібні сферичні фрагменти – паливний туман. На практиці цей ефект спостерігався в камерах згоряння котлів у вигляді збільшення яскравості полум'я при використанні водорідних емульсій. У краплях емульсії малого діаметра випаровування води відбувається при більш високих температурах, що передбачає якісно інший процес. Такі краплі будуть запалюватися, поки в їх обсязі не з'явиться конкурентна фаза. При цьому процеси перетворення води в пару відбуваються за гомогенною схемою на кінцевих етапах вигорання крапель. При застосуванні водорідних емульсій в топленнях котлів, що працюють на важких видах палива, у зв'язку з наявністю в полум'ї відносно великих крапель бажана дисперсія, що забезпечує мінімальну кількість водних включень при заданому вмісті води. Такі краплі характеризуватимуться мікробухом, який призведе до дроблення початкової краплі на трохи більші фрагменти.

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що горіння крапель водопаливної емульсії супроводжується явищем мікрровибуху при їх нагріванні в камерах згоряння, параметри якого визначаються об'ємним вмістом води в паливі та дисперсністю емульсії. Можливі три якісно різні процеси перетворень водної фази, кожен з яких супроводжується різними закономірностями дроблення вихідних крапель палива.

Висновки до розділу 2

1. Вібраційне горіння водопаливної емульсії розглядається як автоколивальне явище, причиною якого є мікрровибухи крапель емульсії. Існують такі типи нестійкості горіння: низькочастотна, акустична (високочастотна) та нестійкість на проміжних частотах, кожен з яких характеризується певними частотами коливань та має свої причини виникнення.

2. Найбільш небезпечною є високочастотна нестійкість, що виникає при резонансі частоти коливань з власними частотами камери згоряння. Для її подолання необхідно вживати відповідних заходів для зменшення впливу факторів, які сприяють її появі – запізнювання запалення, зміна часу підготовчих процесів та швидкість хімічних реакцій.

3. Математичний опис автоколивань в процесі горіння є досить складним завданням, що пов'язано з нелінійністю властивостей процесу горіння та необхідністю вирішення нелінійних рівнянь в частинних похідних.

4. Вібраційне горіння є небажаним явищем в процесі спалювання, може призвести до пошкодження та зниження ефективності роботи енергетичних установок. Але воно може мати і позитивні наслідки – інтенсифікувати процеси тепломасообміну, покращити агломерацію часток і коагуляцію аерозолів, а також збільшити теплонапруженість топкового об'єму і зменшити кількість

шкідливих викидів в атмосферу.

5. Температура фазових переходів вода-пара в емульсії залежить від об'єму крапель і величини їхнього вологовмісту. Вода в краплях може бути в перегрітому стані, а температура початку фазових перетворень зменшується з ростом радіусу краплі води.

6. Дослідження показали, що мікрровибухи відбуваються переважно в краплях великого діаметра з більшим вологовмістом, що підвищує ймовірність запалення. Краплі водопаливної емульсії запалюються швидше, ніж звичайне безводне паливо завдяки додатковому дробленню крапель внаслідок мікрровибухів. Нагрівання супроводжується вибухоподібним скипанням води, що може відбуватися як за гетерогенною, так і за гомогенною схемами.

7. Отримані дані показують, що горіння крапель ВПЕ супроводжує явище мікрровибуху у разі їх нагріванні в камерах згоряння, параметри якого визначаються об'ємним вмістом води в паливі та дисперсністю емульсії. Розрізняють три різні процеси перетворень водної фази, які якісно відрізняються одини від одного та супроводжуються різними закономірностями дроблення вихідних крапель палива.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОРОЗІЇ ТА ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ

3.1 Виникнення високо- і низькотемпературної корозії при спалюванні рідких палив

Сьогодні у енергетиці при використанні важких низькоякісних рідких палив актуальними залишаються проблеми виникнення корозії та забруднення поверхонь нагрівання енергетичних установок, елементів ДВЗ і ГТД. Мінеральні сполуки палива є основним фактором, який визначає інтенсивність і характер високотемпературної корозії (ВТК) і зношування. Але вони також впливають і на появу низькотемпературної сірчистої корозії (НТК).

При впливі на поверхню металу продуктів згоряння, що містять кисень і пари сірчаної кислоти, можливе протікання двох процесів (рис. 3.1) – окислювання сталі з утворенням оксидів заліза та взаємодії сталі з кислотою з виділенням сульфатів [70-73].

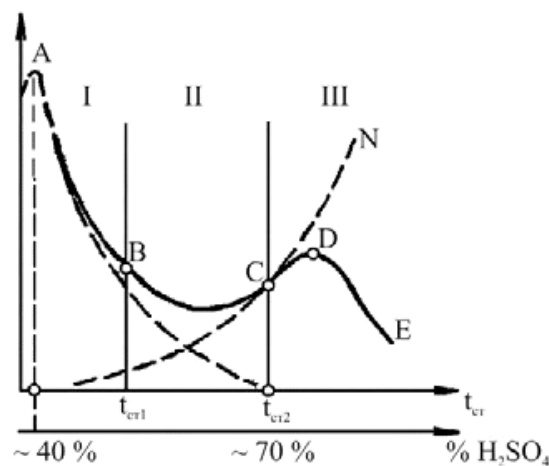


Рисунок 3.1 – Крива залежності швидкості корозії від температури стінки

У результаті взаємного впливу цих двох процесів можливе утворення двох корозійних зон: зони I, де значення сумарної кривої швидкості корозії K визначається швидкістю взаємодії металу з кислотою, а продуктами корозії є

сульфати (ділянка АВ), і зони II, де швидкості обох процесів приблизно дорівнюють одна одній. У другій зоні сумарна крива К буде мати мінімум (ділянка ВС).

Продуктами корозії є сульфати та оксиди заліза. При порівняно високій температурі стінки $t_{\text{ст}} > 90...110$ °С на поверхні повинен конденсуватися розчин H_2SO_4 з концентрацією більше 70 %. При такому рівні концентрації кислота вже не взаємодіє зі сталлю, і поверхня металу пасивується. У результаті сульфати заліза не утворюються, а процес газової корозії, що протікає з утворенням оксидів заліза, гальмується. Наслідком цього є виникнення третьої корозійної зони, де крива швидкості корозії має максимум (ділянка DE).

Поява мінімуму швидкості корозії при $t_{\text{ст}} \approx 80$ °С обумовлено появою туману сірчаної кислоти, що спостерігається і у процесах сірчано-кислотного виробництва контактним способом [74]. Пара конденсується з утворенням туману, що складається з дрібних крапель кислоти, при певному критичному перенасиченні пари $S > S_{\text{кр}}$. Після досягнення максимального значення S , особливо при утворенні туману, кількість кислоти, що конденсується, знижується.

Отримані дані численних вимірів температури точки роси за методикою побудови залежності швидкості збільшення струму між електродами $di/d\tau = f(t_{\text{ст}})$, що відповідає кількості кислоти, яка сконденсувалася, також підтверджують існування максимуму й мінімуму на кривій залежності кількості адсорбованої вологи від температури (рис. 3.2). Необхідно відзначити наявність максимуму та мінімуму при вимірюванні електрорушійної сили $dE/dx = f(t_{\text{ст}})$, а також незначне збільшення її максимального значення і деякого зсуву у бік менших температур при збільшенні вмісту води [75] (рис. 3.3).

При корозії низькотемпературної поверхні в атмосфері димових газів поглинання пари H_2SO_4 відбувається в результаті дії трьох типів адсорбції, а саме хемосорбції (до рівня температури, що відповідає кислотному максимуму),

активованої хемосорбції (при більш низьких температурах) і фізичної адсорбції (при температурах 80...60 °C), при яких знову спостерігається ріст кількості поглиненої пари H_2SO_4 і починається конденсація H_2O . Внаслідок цього спостерігаються максимуми й мінімуми на кривій цій залежності. Дані прямих вимірів підтверджують існування максимуму на кривій залежності кількості адсорбованої H_2SO_4 от температури відкладень.

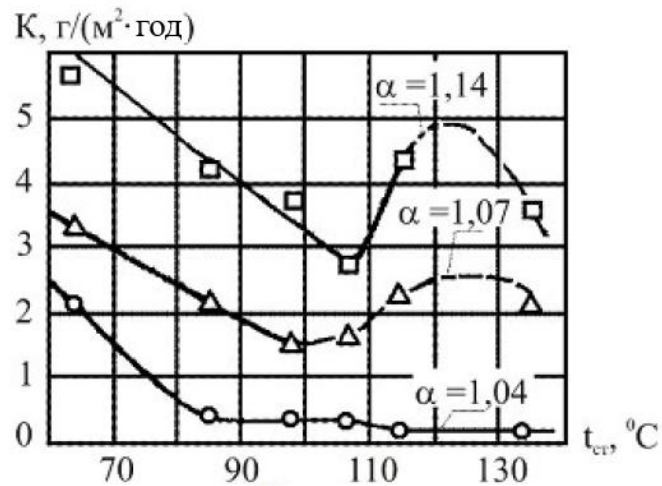


Рисунок 3.2 – Оцінки інтенсивності корозійного процесу шляхом прямих вимірювань швидкості корозії

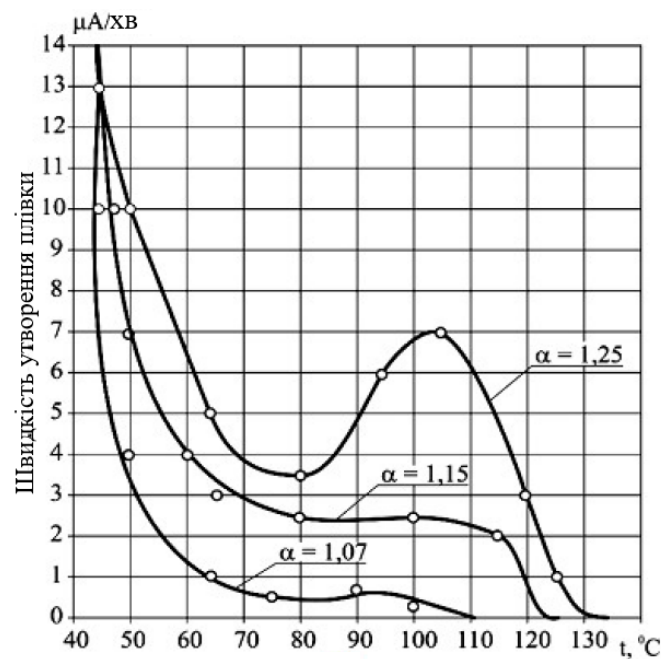


Рисунок 3.3 – Оцінка інтенсивності корозійного процесу шляхом вимірювання швидкості зміни струму di/dt

На швидкість корозії значний вплив має ступінь зволоженості відкладень поверхні нагрівання. При вологості 15...25 % незалежно від складу відкладень спостерігається максимальна швидкість корозії металу (рис. 3.4).

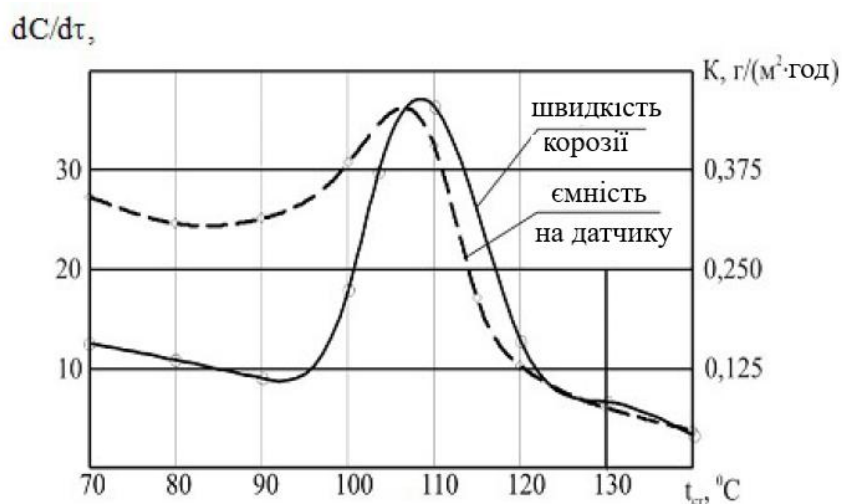


Рисунок 3.4 – Оцінка інтенсивності корозійного процесу шляхом вимірювання зміни швидкості зміни ємності

Збільшення швидкості корозії при зміні вологості від 0 до 15...25 % порозумівається зменшенням омичного опору виникаючих корозійних елементів [76]. При вологості відкладень більше критичної дифузія деполаризаторів O_2 і SO_2 до металу утруднюється та швидкість корозії знижується.

Важливим фактором, що помітно впливає на швидкість електрохімічної корозії, є розчинність продуктів корозії в сірчаній кислоті, що сконденсувалася, що визначає ефективність протікання анодного процесу. Згідно [77] крива розчинності H_2SO_4 практично еквідистантна швидкості корозії (див. рис. 3.4).

Присутність у мінеральному залишку важких палив оксидів ванадію і солей натрію приводить до ВТК окремих елементів енергетичних установок. Глибина утилізації вихлопних газів ДВЗ і ГТД, економічна ефективність котлів істотно залежать від температури газів, що йдуть, значення якої визначається швидкістю НТК, що при спалюванні сірчистих мазутів може сягати 1,2 мм/рік.

Тому важливою задачею є вирішення проблеми забезпечення зниження швидкості НТК до припустимого рівня (0,25...0,3 мм/рік), що дозволить знизити температуру відхідних газів до 110-115 °С. Ця можливість може бути реалізована при спалюванні важких сірчистих мазутів у вигляді ВПЕ з вдовмістом W^p на рівні 30 %.

Однак проблемам інтенсивності ВТК і НТК при спалюванні ВПЕ на основі сірчистих мазутів не приділялося достатньо уваги.

При температурах поверхні металу вище 450 °С під розплавом з'являються забруднення, що складаються з відкладень золи палива і продуктів корозії, спостерігається високотемпературна корозія поверхонь нагрівання, інтенсивність якої залежить від багатьох факторів, але мінеральна сполука палива, що спалюється, вважається тут основним фактором, що визначає інтенсивність і характер зміни швидкості ВТК.

При спалюванні важких рідких палив такі сполуки, як оксид ванадію (V_2O_5) і солі натрію (Na_2SO_4 , $NaCl$), є найбільш агресивними складовими. Причому ВТК відбувається тим інтенсивніше, чим більше в паливі вміст натрію, ванадію й сірчистих сполук. Сполуки хлору є досить активними прискорювачами корозії. Основну роль при ВТК грає хлорид натрію $NaCl$, що вступає в реакцію із сірчаною кислотою і утворює сульфат натрію Na_2SO_4 та соляну кислоту HCl у її паровій фазі.

При необхідності спалювання важких залишкових палив застосування ВПЕ дозволяє забезпечити цілий ряд переваг: підвищення паливної економічності; зниження кількості твердих часток у вихідних газах; розширення можливостей спалювання низькосортних і високов'язких палив (у тому числі утилізації нафтових залишків після мийки танків, відходів сепарації й т.п.); зниження вмісту у випускних газах NO_x і ін.

Характер розвитку процесу корозії істотно залежить від часу впливу агресивних компонентів золи палив. Тому для з'ясування механізму ВТК при

аналізі результатів досліджень швидкості корозії, величина якої залежить від впливу різних факторів, велике значення має вивчення кінетики розвитку інтенсивності процесу. Знаходження регресійних рівнянь кінетики корозії дозволить прогнозувати розвиток ВТК на будь-який час впливу газів і навести дані, отримані різними авторами при різній тривалості процесу, до однакового часу, щоб вірогідно оцінювати результати досліджень.

Рішення завдання зниження інтенсивності ВТК вплине на ресурс роботи металу, режим експлуатації, а також на техніко-економічні показники котлів, ДВЗ і суднові енергетичні установки в цілому.

Якість води, що використовується для приготування ВПЕ, критично впливає на її характеристики, такі як: температура кипіння крапель води; характер мікрровибухів цих крапель; склад і якість газів, що виділяються; розміри та обсяги твердих часток, а також інтенсивність низькотемпературної і високотемпературної корозії. Сьогодні чітких стандартів щодо якості води для ВПЕ наразі немає.

3.2 Корекція фізико-хімічного складу водопаливних емульсій при спалюванні в котельних установках

Зниження працездатності котлів і їх низький ККД при спалюванні важких сірчистих мазутів пов'язаний з високими значеннями викидів токсичних інгредієнтів і теплових викидів в довкілля, наявністю високотемпературної, і особливо, низькотемпературної корозії. У котлах значення температури стінки поверхонь нагрівання $t_{ст}$ при спалюванні рідких палив більше 130 °С, а температура димових газів на виході з котла – 140...160 °С. При цьому спостерігається низькотемпературна сірчаноокислотна корозія (НТК), швидкість якої сягає 1,3 мм/рік. Внаслідок цього в промислових та утилізаційних котлах конденсаційні поверхні не використовуються.

У публікаціях останнього років представлені узагальнені дані щодо

перспектив застосування водопаливних емульсій (ВПЕ) [78-84], їх властивостей [78, 80] та способів підготовки [79]. Особлива увага приверталася на рівень дисперсності та необхідність забезпечення стабільності одержуваних ВПЕ [78, 81]. Приводяться також дані про істотне поліпшення процесів горіння внаслідок мікрровибухів крапель водопаливних емульсій, що дозволяє підвищити рівень економії палива [81, 85], а також відомості про зниження емісії шкідливих речовин у димових газах [78-81, 86, 87].

Переваги застосування водопаливних емульсій у порівнянні із традиційним нафтовим паливом визначається за п'ятьма критеріями (зниження викидів NO_x і твердих часток, утилізація нафтомасловмісних вод, величини водовмісту, витраті емульсій та чистого палива в них [78, 82, 84]). За даними [79, 81, 86] економія палива знаходиться в межах від 13,56 % при водовмісті 8 % до 22,24 % при водовмісті 15 %. Згідно дослідженням зі зростанням значення W^p ВПЕ до 40 % включно спостерігається зменшення витрати чистого палива. Витрата емульсії до водовмісту $W^p = 25$ % практично дорівнює витраті сухого палива при $W^p = 0$ %.

Відзначається одночасне зниження вмісту NO_x і твердих часток, а також CO , SO_2 , H_2S і вуглеводнів C_xH_y при забезпеченні відповідного керування режимами роботи котлів. Присутність води в емульсії приводить до зниження температури полум'я та зміні складу реагентів, що супроводжується збільшенням концентрації радикалів OH^\cdot , що контролюють швидкість утворення NO_x [78, 82, 88]. Зокрема для котельних установок важливе значення має забезпечення оптимального надлишку та вологості повітря [87, 89]. Для подачі води в зону реакції в основному використовують два способами: упорскування в повітря або в ядро факелу пари або води та застосування водопаливних емульсій.

З урахуванням значної кількості публікацій про позитивний вплив мікрровибухів краплі емульсії на процес горіння внаслідок їхнього вторинного

розпилювання та посилення турбулентності у факелі, існує ще значна кількість невирішених проблем щодо впливу процесу мікрровибуху на його фізику і хімічну кінетику [5, 11].

Вільний радикал OH^\cdot , що має високу хімічну активність, у процесі горіння вступає у взаємодію з вуглеводнями. Швидкість реакції горіння пропорційна концентрації гідроксилу OH^\cdot [66, 88]. Тому важливим фактором поліпшення процесу горіння емульсій є попереднє накопичення вільних радикалів при їхній підготовці.

Підготовка емульсій здійснюється різними способами: механічних з системою ротор-статор; емульгуванням за допомогою мембран (наприклад, премікс-мембран) і мікроканалних емульгаторів, а також ультразвукових гомогенізаторів. Виконується підготовка емульсій в промислових масштабах без використання яких-небудь поверхнево-активних речовин.

У роботі [68] представлені дані про порівняльні випробування спалювання важкого мазуту та мазутної емульсії з використанням до 10 % стічної води, згідно яких ефективність роботи котла підвищується на 10 % при одночасному скороченні витрати палива. При цьому викиди SO_x знизилися на 3,3...7,1 %, твердих часток – на 41...85 %, CO – на 89...93 %, NO_x – до 23 %, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, зокрема бензо(а)пирену, на 37,7 і 61,8 % відповідно. Використання стічних вод в обсязі до 20 % в емульсії забезпечило не тільки безпечне видалення промислових стічних вод із вмістом нафтових залишків до 440 мг/дм^3 , а і економію енергії до 13 %.

На думку фахівців фірми MAN вимоги по зниженню рівня емісії SO_x , NO_x можна виконати за допомогою таких технологій: використання ВПЕ, зволоження дуттьового повітря, рециркуляції вихлопних газів, селективного каталітичного зниження емісії NO_x .

Радикальним, але при цьому досить простим способом зниження вмісту сірчистих сполук та оксидів азоту в димових газах енергетичних установок є

очищення газів за допомогою скрубєрних технологій [90, 91]. Випробування системи CSNO_x показали, що при значеннях вмісту токсичних речовин на виході з котла паропродуктивністю 60 т/год концентрації SO_2 на рівні 669,3 ppm, NO_x – 158,5 ppm і CO_2 – 5,16 % на виході зі скрубєра. Вміст цих речовин після очищення газів склав: 47,4 ppm – SO_2 ; 28,2 ppm – NO_x і 1,32% – CO_2 . Таким чином, емісія шкідливих речовин знизилась: SO_2 – на 92,9 %, NO_x – на 82,2 %; CO_2 – на 74,4 %. Зазначена ефективність використання скрубєрної технології прийнята за основу при оцінці застосування мокрих скрубєрів у розробленій комплексній технології.

Як відомо з теорії фізико-хімічних процесів сірчаноокислотного виробництва по нітрозному механізму [92], забезпечення в потоці газів еквімолярного або близького до нього співвідношення $\text{NO}_2:\text{NO}$ приводить до відповідного вмісту N_2O_3 в нітрозі при температурах 80...130 °С, що відповідає температурам процесів на низькотемпературних поверхнях нагрівання котлів при конденсації пари сірчаної кислоти. При концентрацій $\text{H}_2\text{SO}_4 \sim 57$ % відбувається різкий ріст інтенсивності абсорбції SO_2 (у 6...8 разів). Якщо забезпечити такі умови при спалюванні ВПЕ, то відповідно можливо інтенсифікувати процеси абсорбції та зменшити розміри скрубєрів [19, 20]. Крім того, необхідно відзначити, що в нітрозному виробництві H_2SO_4 застосовуються вуглецеві сталі (для трубопроводів, теплообмінників, тощо), так як після 20 годин під впливом оксидів азоту відбувається пасивація поверхні металу.

Проведені дослідження та експлуатаційний досвід показали, що використання емульсії в котлах забезпечує: надійність спалювання мазуту із вмістом у ньому води до 50 %; високу економічність спалювання мазуту при обводнюванні до 25...30 %; підвищення ККД котельної установки й зниження витрати сухої чистої маси палива. При спалюванні ВМЕ на основі важкого мазуту з водовмістом 30 % при $\alpha = 1,3$ внаслідок мікрровибухів її крапель інтенсивність забруднення та корозії істотно знижуються, а періодичність між

очищеннями збільшується в 2...3 рази.

Практично відсутні дані про інтенсивність корозійних процесів у котлах при спалюванні водопаливних емульсій. Проте досить широко представлені дані про механізм процесів електрохімічної корозії [93-95], у яких розглядається вплив Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- без урахування впливу спалювання ВПЕ; вплив присадок на стан металу [96, 97]; методи боротьби з наслідками корозії [98], де пропонується заміна вуглецевої сталі на більш корозійностійку нержавіючу сталь або підвищення температури поверхні нагрівання.

Аналіз представлених вище літературних джерел показує, що варто розглядати два роздільно діючі механізми високотемпературної корозії: ванадієвого – під впливом сполук ванадію, (особливо ванадату натрію NaVO_3); сульфатного – під впливом хлоридів SO_2 , O_2 і сульфатів, які з'являються у відкладеннях внаслідок перетворення хлоридів у сульфати протягом ~ 3 годин. Сульфатний механізм високотемпературної корозії має більш істотне значення, чим ванадієвий.

Найбільш перспективними варто вважати комплексні технології, як обробки палива, так і води перед їх змішуванням [99]. Близькою до запропонованої в роботі системи підготовки прісної води та самої водопаливної емульсії є система підготовки емульсії з електрохімічною обробкою води в електролізері. Розбіжність у значеннях техніко-економічних та екологічних показників спалювання водопаливної емульсії обумовлюється різними методами підготовки води та емульсії, відсутністю обліку рівня активності води і ВПЕ безпосередньо перед спалюванням, а також різною якістю (солевмістом) прісної води, що використовується для підготовки емульсії з різним водовмістом.

Відсутні конкретні вимоги до якості прісної води, показники якості якої не регламентовані (особливо за значенням її солевмісту). Є обмежена кількість даних по інтенсивності високотемпературної та низькотемпературної

сірчаноокислотної корозії при спалюванні водомазутної емульсії з різним водо- і солевмістом. Це потребує додаткових розробок конструктивних схем промислових і утилізаційних котельних установок з використанням конденсаційних поверхонь нагрівання, виготовлених з вуглецевих сталей при спалюванні сірчистих водомазутних емульсій.

3.3 Експериментальні дослідження корозії при спалюванні ВПЕ

Дослідження процесів впливу мінеральної частини палива та води при спалюванні ВПЕ, температури поверхні металу $t_{ст}$ і коефіцієнту надлишку повітря α на інтенсивність ВТК і НТК при різному солевмісті води можлива на основі проведення експериментальних досліджень. Схема установки для дослідження процесів корозії представлена на рис. 3.5.

Установка складається з наступних основних елементів: топкова камера 1, пальник 2, система підготовки палива 3, газохід 4 з робочими ділянками, де знаходяться зразки для дослідження високотемпературної 5 і низькотемпературної корозії 6. Повітря подається через повітропідігрівник до пальникового пристрою за допомогою вентилятора 7. Для подачі димових газів з установки використовувався димососом. Охолодження зразків для дослідження процесів ВТК здійснюється подачею повітря з ресивера 9.

Охолодження зразків для дослідження НТК проходило за рахунок подачі повітря з ресивера 9 або із чотирьох термостатів 24 водою та олією.

Камера горіння має наступні габарити: довжина – 800 мм; внутрішній діаметр – 300 мм. Форма топкової камери забезпечує рівномірне заповнення її факелом. Топлення та газохід усередині футеровані вогнетривкою цеглою, в якості пальникового пристрою в установці використовується ротаційна форсунка. Димові гази з топлення надходять у металевий газохід з розмірами живого перетину 80x103 мм. Охолодження топлення відбувається за рахунок теплопередачі в навколишнє середовище через неохолоджувані стінки камери.

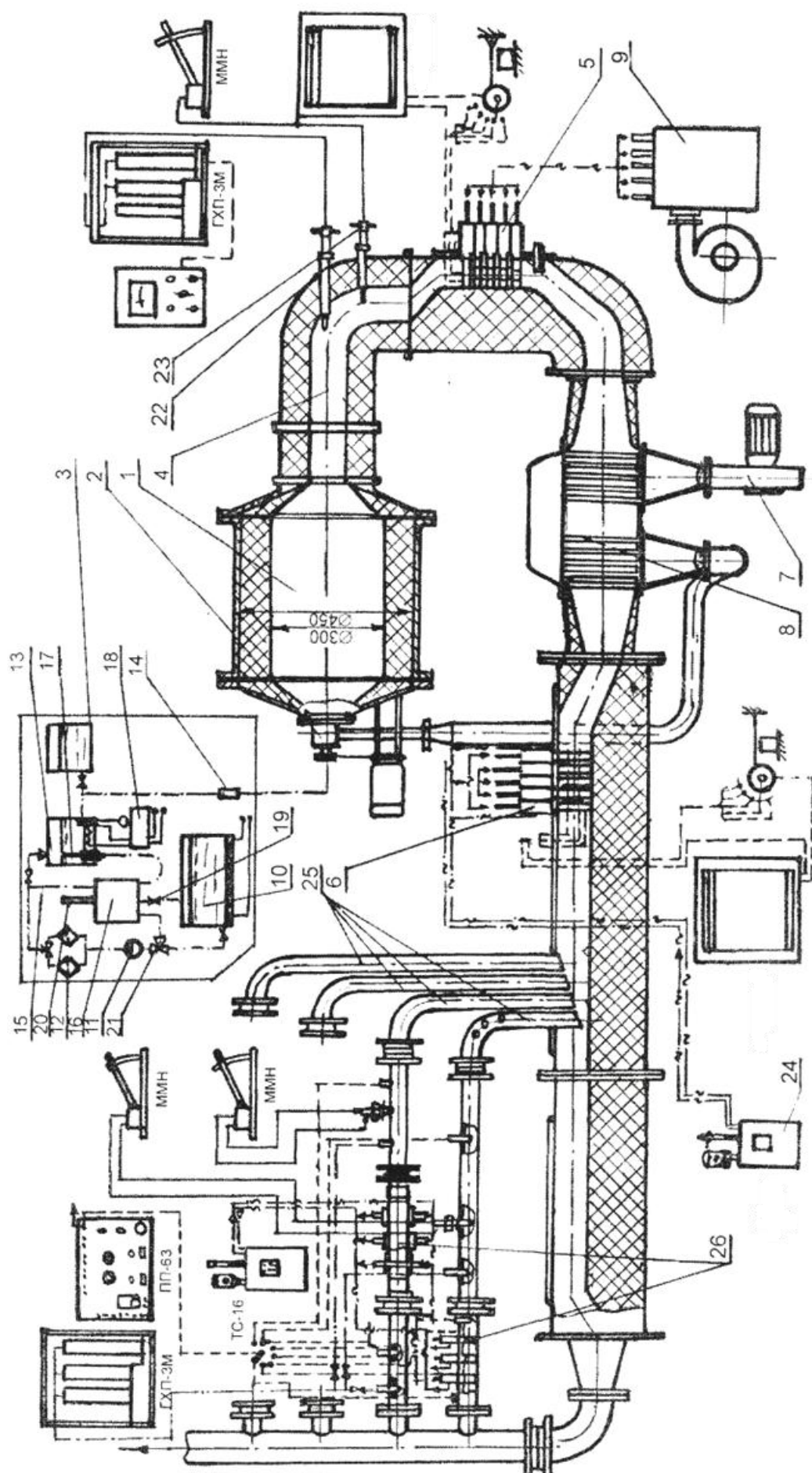


Рисунок 3.5 – Загальна схема установки для дослідження корозії

Паливна система призначена для подачі до пальника від 1 до 3 кг/год мазуту та ВМЕ із в'язкістю 2...2,5°ВУ. Паливо (мазут або ВМЕ) подається у витратний бачок 13 із цистерн основного запасу 10 насосом 11 через здвоєний фільтр 12, де воно підігрівається до температури 70...90 °С. Особливістю роботи паливної системи є забезпечення подачі невеликої кількості палива протягом усього часу експерименту (тривалістю до 100 год.). Для цього використовувалася крапельниця 14, куди паливо потрапляє самопливом. В установці передбачена система рециркуляції палива через вимірювальний бачок 16 на цистерну 10, що одночасно підтримувало й необхідний рівень кавітаційного стану ВМЕ. Робота насоса, наявність системи рециркуляції, через яку проходить більша частина палива, сприяють також стабілізації сполук емульсії. Для підтримки постійного рівня у витратному бачку передбачена переливна труба 17, через яку надлишок палива через мірний бачок 16 зливається в цистерну 10. Для забезпечення різної витрати палива шляхом зміни висоти рівня передбачена також можливість переміщення переливної труби по висоті. Електронагрівник витратного бачка включений через комбіноване реле, що дозволяє забезпечити постійність температури і в'язкості палива.

Для контролю витрати палива був застосований спеціальний пристрій – крапельниця, де безперервний струмінь палива дробиться на окремі краплі, частота падіння яких легко визначається за допомогою стробоскопа. Погрішність виміру витрати палива становить приблизно 1 %. При більших витратах палива паливна система перемикається на вимір за допомогою мірного бака 16. У цьому випадку злив палива з бачка припиняється шляхом перекриття вентилі 19, паливо заповнює бачок до верхньої відмітки вимірювальної трубки 20. Після цього при переключенні триходового крана 21 насос 11 перемикається на вимірювальний бачок 16. Таким чином, можна говорити про роботу замкненої системи: насос 11 → лінія рециркуляції 15 → витратний бачок 13 → вимірювальний бачок 16 → насос 11. Погрішність виміру витрати палива в цьому випадку становить від 1 до 1,5 %.

Сталість витрати палива контролювалася також шляхом автоматичного контролю рівня температури газів на виході з топлення за допомогою відсмоктувальної термопари. При постійній витраті повітря навіть незначна зміна у витраті палива приводить до коливання температури газів на виході з топлення (виявленні коливання є сигналом до коригування витрати палива). Для відбору димових газів та визначення їх складу перед робочою ділянкою ВТК на виході з топлення встановлена газозабірна трубка 22, яка охолоджується водою. Поруч із нею знаходиться відсмоктувальна термопара 23 для вимірювання температури димових газів на виході з топкової камери.

Аналіз складу димових газів на виході з камери здійснюється за допомогою хімічного газоаналізатора (вміст RO_2 і O_2) і хроматографа (вміст CH_4 , C), газоаналізатора ОКСИ-5М (контроль усіх параметрів горіння, включаючи вміст SO_2 , NO і NO_2). Вміст компонентів димових газів визначався також перед і після робочої ділянки з дослідження низькотемпературної корозії.

У газоході експериментальної установки для дослідження корозійного впливу димових газів розміщені робочі ділянки із трубками-зразками (зовнішній діаметр 25 мм). Першою по ходу газів встановлена робоча ділянка труб-зразків для досліджень ВТК (рис. 3.6).

Робоча ділянка з трубками-зразками для дослідження НТК знаходиться в області температур димових газів 350 °С (рис. 3.7). Пакет труб-зразків 2 з досліджуваних марок стали знаходиться на монтажній плиті 1. Кожна труба кріпиться за допомогою гвинта 3, гайки 4 та пружини 5, завдяки чому забезпечується компенсація температурного розширення зразків. Вони набираються на плиті в шаховому порядку із кроками 30 мм. Для вимірювання температури димових газів перед пакетом та після нього приварені гільзи 6 для установки термометрів або термопар, а також трубки 7 для вимірювання розрідження та відбору димових газів для визначення його складу.

Підведення охолоджуючого середовища до трубок-зразків здійснювалося

від термостатів 24 (див. рис. 3.5) до центральної трубки, а відведення – через штуцер (рис. 3.8).

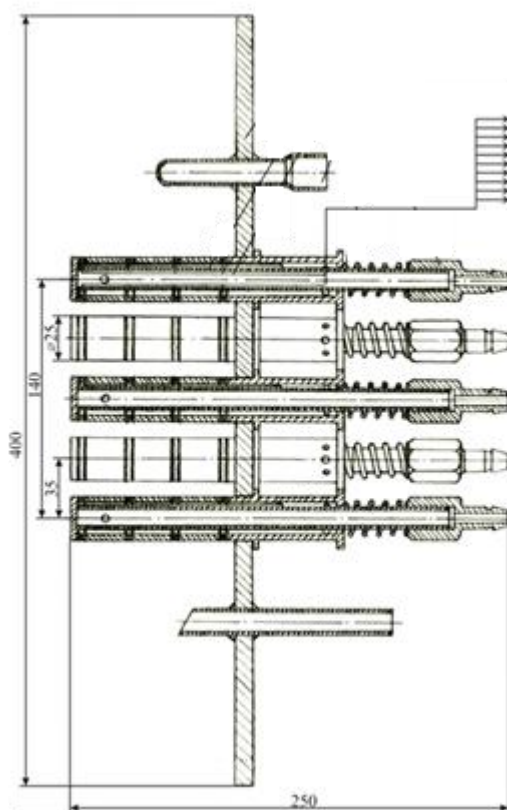


Рисунок 3.6 – Загальний вид труб-зразків робочої ділянки для дослідження високотемпературної корозії

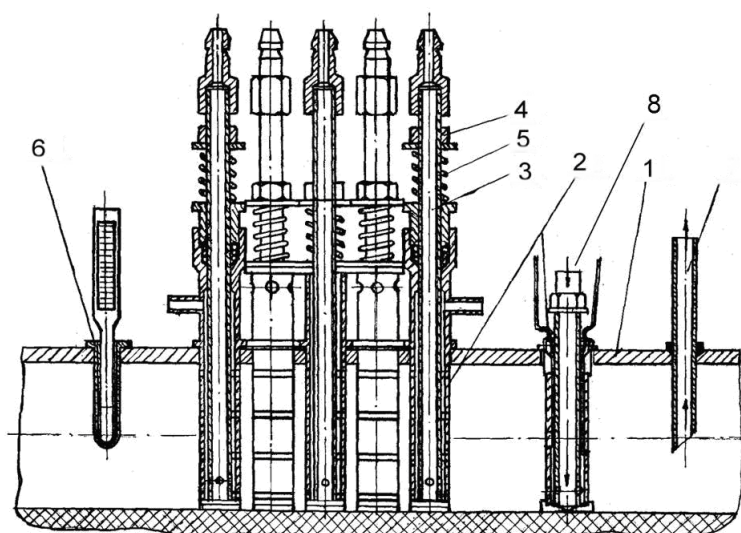


Рисунок 3.7 – Загальний вид труб-зразків робочої ділянки для дослідження низькотемпературної корозії

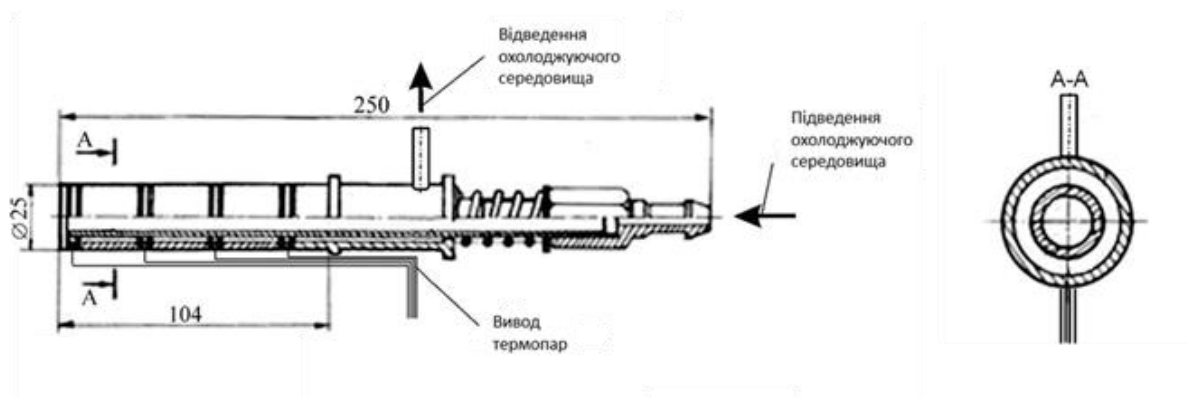


Рисунок 3.8 – Загальний вид труб-зразків з охолодженням
рідким теплоносієм

Температура металу зразка вимірювалася за допомогою термопар, які встановлювалися між трубками-зразками. Значення температур протягом експерименту реєструвалися автоматичними потенціометрами. До і після робочої ділянки по дослідженню НТК встановлювалися датчики температури точки роси димових газів (див. рис. 3.7). Вимірювання швидкості та витрати димових газів в газоході, де встановлювалися труби-зразки, проводилося швидкісною трубкою ВТІ та похилим мікроманометром типу ММН-1.

Для проведення одночасних досліджень процесів масопереносу, кінетики корозійних процесів шляхом прямих вимірювань швидкості корозії та непрямими методами (вимірюванням за допомогою ємнісного датчика) в установці передбачені байпасні газоходи 25, де встановлювалися зразки труб 26 для дослідження кінетики НТК. Швидкість димових газів в області установки труб-зразків становила 7...8 м/с. Фіксована витрата димових газів через байпасний газохід забезпечувалася за допомогою швидкісної трубки ВТІ 27 (див. рис. 3.5).

Схема установки для підготовки ВПЕ до спалювання в експериментальному стенді здійснювалася в спеціальній установці, схема якої представлена на рис. 3.9.

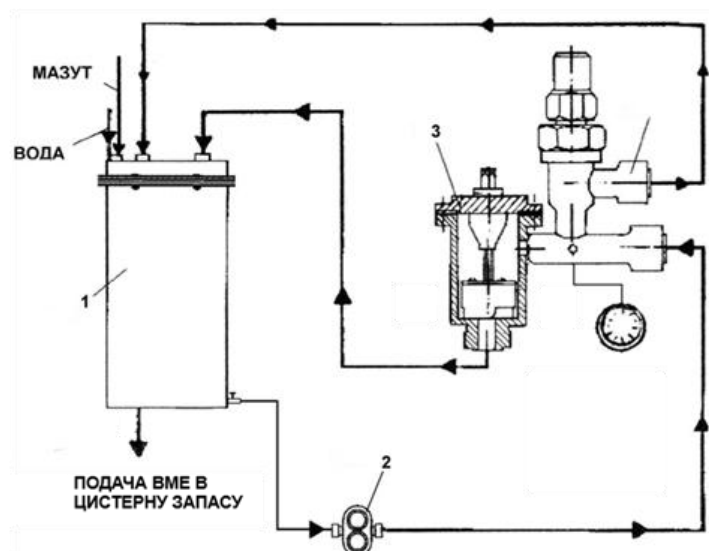


Рисунок 3.9 – Схема установки для приготування водопаливної емульсії

Паливо і вода вводиться у змішувальний бак 1 в необхідних кількостях залежно від величини вологовмісту в емульсії. Насос 2 забезпечує циркуляцію водопаливної суміші через диспергатор 3 для отримання емульсії з розміром краплі води 15...30 мкм. Саме при таких діаметрах крапель досягається найкраща якість горіння ВПЕ, обумовлена турбулентністю факела із-за мікрровибухів крапель емульсії.

При перевищенні встановленої величини тиску перед диспергатором спрацьовує пружинний запобіжний клапан 4 і відбувається скидання емульсії в змішувальний бак 1 через спеціальний трубопровід. Якість емульсії перевірялася за допомогою мікроскопа. Підготовлена емульсія перекачується в цистерну експериментальної установки.

3.4 Дослідження інтенсивності корозії при використанні водопаливної емульсії

Для оцінки впливу на процеси корозії різних факторів, таких як коефіцієнт надлишку повітря α , солевміст води, рівень кавітаційної обробки води, водовміст W^p і солевміст ВПЕ, дослідження були проведені на

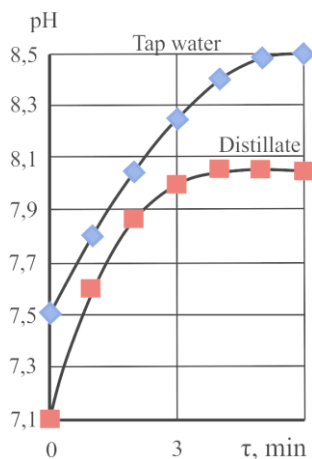
експериментальній установці, що описана вище.

Інтенсивність корозійних процесів визначалася за різницею мас металу при встановленні охолоджуваних зразків труб у газохід при температурі газів ~ 1000 °C при дослідженнях високотемпературної корозії та ~ 200 °C при дослідженнях низькотемпературної корозії. З метою порівняння корозійної стійкості марок сталей використовувалися зразки труб з вуглецевої сталі 20 і нержавіючою сталі 1X18H10T. Вибір саме таких марок сталі пояснюється тим, що вони перебувають на протилежних сторонах діапазону корозійної стійкості серед сталей, які використовуються в енергетичних установках. Всі серії досліджень проведені при використанні однієї проби мазуту М40 із вмістом сірки $S^p = 1,8$ %, що забезпечило однакову концентрацію ванадію в паливі на рівні 0,0014 % і надало можливість чіткого визначення впливу вмісту NaCl у воді та припустимого солевмісту ВПЕ на інтенсивність корозійних процесів. Показник рівня кавітаційної обробки емульсій оцінювався за значенням рН (діапазон 8,0...8,5) і діаметру крапель води (1...2 мкм). Контроль якості горіння мазуту та водопаливної емульсії на його основі, значень викидів NO_x , SO_2 , CO_2 контролювалися за допомогою хроматографів Газохром-3101 і ОКСИ-5М (відносна погрішність на рівні ± 5 %). Сталість витрати палива (погрішність виміру ± 1 %) під час проведення експерименту контролювалося по стабільності температури газів на виході з камери згоряння установки на рівні 1200 °C за допомогою спеціальної екранованої відсмоктувальної термопари. Точність вимірів температур складала ± 5 °C. Діапазон зміни солевмісту водопаливної емульсії становив 17...490 мг/дм³, водовмісту – від 2 до 30 %.

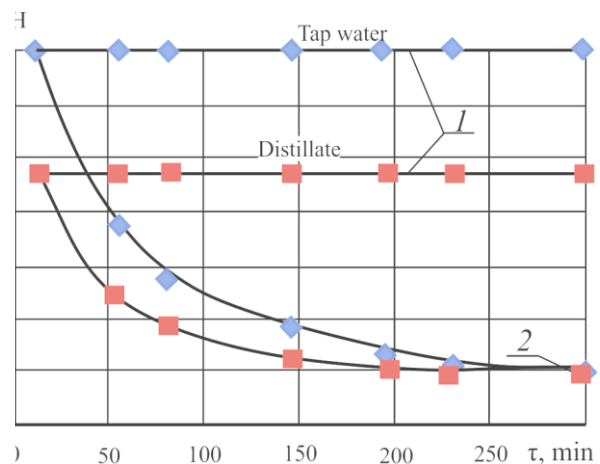
Система підготовки водопаливної емульсії складається із двох контурів: попередньої кавітаційно-циркуляційної підготовки та підтримки отриманої її якості безпосередньо перед пальником. У першому контурі відбувається сильна (тверда) кавітаційна обробка емульсії за циркуляційною схемою з гідродинамічним гомогенізатором, у якому здійснюється енергійне закручення потоку при високому тиску тангенціально розташованими лопатками з

гострими крайками та наступним напрямком потоку на дно камери гомогенізатора, де за рахунок гідроудару утворюється дрібнодисперсна структура емульсії. У другому контурі підтримувався постійним досягнутий рівень активності емульсії за рахунок багаторазової циркуляції за допомогою шестерного насоса з відведенням необхідної витрати емульсії через дозатор витрати на ротаційний пальник.

При кавітаційно-циркуляційній підготовці водопаливної емульсії протягом 10...15 хв. стабілізується значення рН, що характеризує вміст іонів H^+ і OH^- у воді та емульсії перед спалюванням. Якщо зберігати готову ВПЕ, то спостерігається втрата активності води в підготовленій емульсії протягом ~ 300 хв. при збереженні стабільності дисперсності протягом двох тижнів (рис. 3.10 а, б).



а)



б)

Рисунок 3.10 – Активність води в емульсії при кавітаційно-циркуляційній підготовці:

- а) активація води при кавітаційній підготовці водомазутної емульсії;
- б) час втрати активності води в підготовленій водомазутній емульсії; 1 - підтримка постійного значення активності у ВПЕ; 2 - стабільний стан ВМЕ (відсутність коагуляції краплі води протягом місяця) але без активності по рН

На основі енергетичних балансів при однакових температурах газів на виході з камери згоряння експериментальної установки на рівні 1200 °С при

спалюванні мазуту і водомазутних емульсій з різним водовмістом (від 2 до 30 %) отримані залежності витрат водомазутної емульсії (рис. 3.11, крива 1) і чистого палива в них (крива 2, Data NUS).

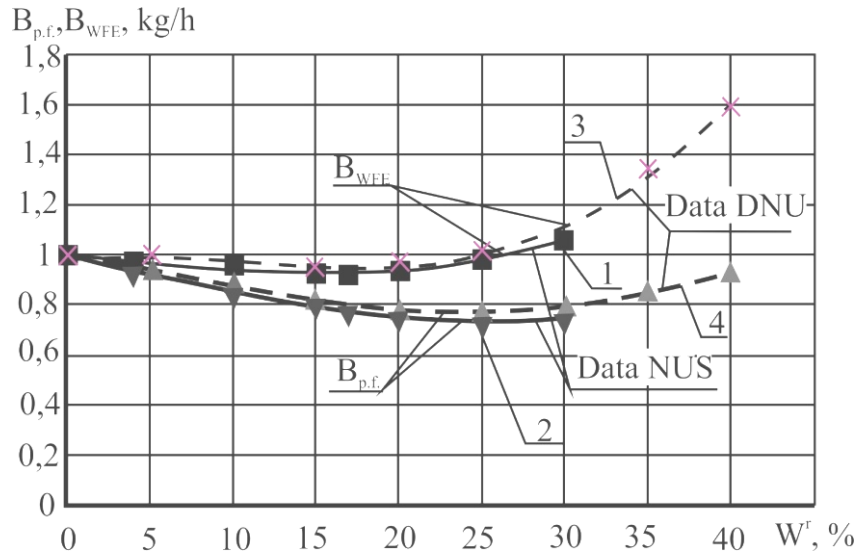


Рисунок 3.11 – Залежності витрати водопаливних емульсій B_{WFE} і чистого палива $B_{p.f.}$ від водовмісту W^p водопаливної емульсії

Також проведено порівняння з аналогічними даними [100] (відповідно криві 3 і 4, Data DNU), які отримані при спалюванні водопаливних емульсій при водовмісті до 40 % на основі пічного палива в котлі за підтримкою постійного значення інтегральної температури факела на рівні 1325 °C.

Встановлено, що економія чистого палива досягає ~25 % при спалюванні ВПЕ у котлах з водовмістом 25...27 %. На підставі цих даних (рис. 3.12) представлені порівняння економічності котлів з урахуванням рівня активності одержуваних емульсій.

При забезпеченні максимального рівня активності кавітаційної підготовки емульсій (крива 1) отримані значення економії палива на 12 % вище в порівнянні з режимом роботи, коли відключений перший контур кавітаційно-циркуляційної обробки (крива 3), що вказує на необхідність забезпечення

максимального рівня активності емульсій безпосередньо перед спалюванням. Залежність значення економічності спалювання водопаливних емульсій на основі пічного палива за даними [89] (крива 2) перебуває між кривими 1 і 3.

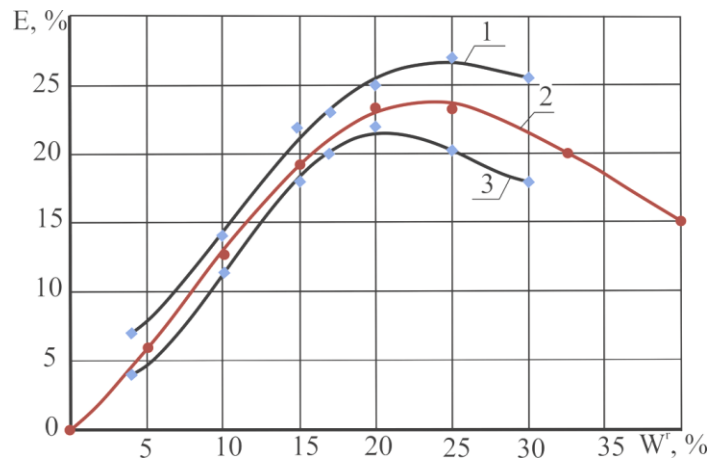


Рисунок 3.12 – Залежність величини економії чистого палива E в емульсіях від їх водовмісту W^p

Рівень впливу фізико-хімічної корекції складу (солевмісту та водовмісту) на хід електрохімічних процесів низько- і високотемпературної корозії, які обумовлюють працездатність елементів енергетичних установок і визначають можливості підвищення техніко-економічних показників, був визначений за даними досліджень інтенсивності корозійних процесів. Проведені експериментальні дослідження кінетики корозії протягом 2, 4, 8, 12 годин дозволили з використанням апроксимаційних рівнянь прогнозувати розвиток корозії протягом будь-якого часу впливу потоку газів τ . Адекватність моделі підтверджена результатами 100-годинних досліджень. Для отримання залежностей інтенсивності корозійних процесів від температури стінки $t_{ст}$ протягом 100 годин, а також з урахуванням періодичності очищення через 1000 годин при спалюванні мазуту та 3000 годин – при спалюванні водомазутних емульсій, використовувався програмний пакет Statgraphics Centurion XV (рис. 3.13 а, б). Тут K_{ADD} – припустиме значення швидкості високотемпературної корозії.

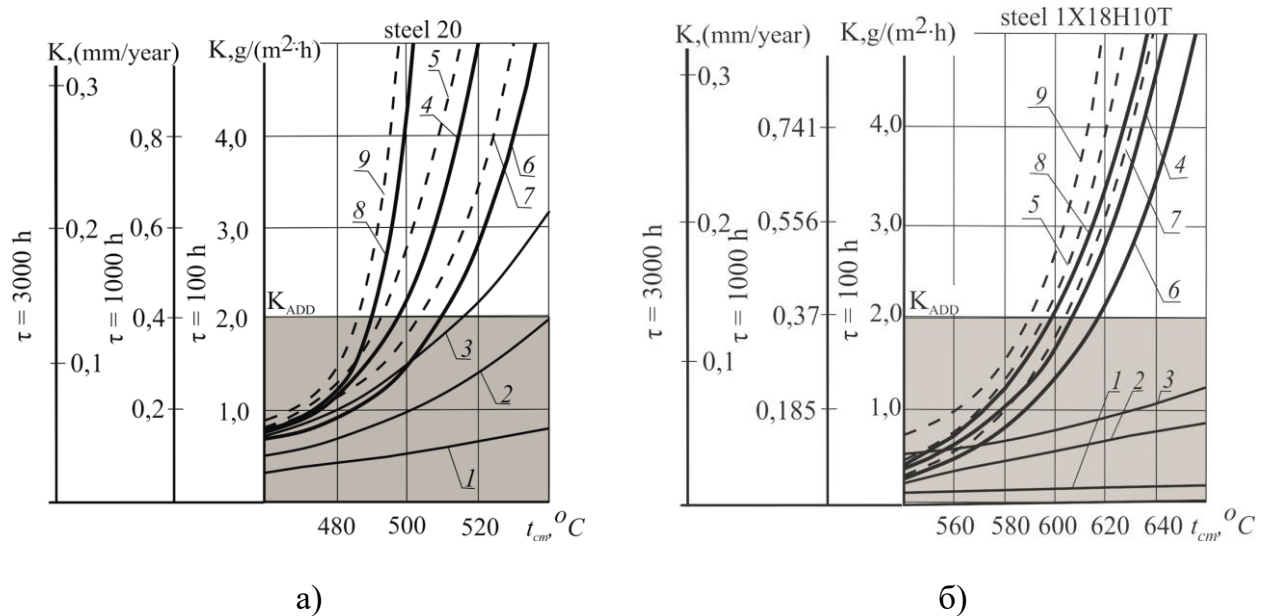


Рисунок 3.13 – Залежності швидкості високотемпературної корозії сталей K при $\tau = 100, 1000, 3000$ годин

На рис. 3.13, а представлені отримані залежності швидкості високотемпературної корозії від температури $t_{ст}$ у межах 460...540° для сталі 20 С і сталі 1X18H10T (рис. 3.14, б) в діапазоні температур 540...660 °С. Дані отримані за умов спалювання мазута М40 при $\alpha = 1,01$ (крива 1), $\alpha = 1,025$ (крива 2), $\alpha = 1,05$ (крива 3), $\alpha = 1,5$ (крива 4), при спалюванні водомазутної емульсії на його основі при $\alpha = 1,5$ із солевмістом 17,0 мг/дм³ (крива 6), 490 мг/дм³ (крива 8), при $\alpha = 3,0$ при солевмісті 17,0 мг/дм³ (крива 7) і при солевмісті 490 мг/дм³ (крива 9).

Дослідження показали, що зі зменшенням солевмісту водомазутної емульсій у зазначених межах температури стінки $t_{ст}$ швидкість високотемпературної корозії знижується в 1,6 рази для сталі 1X18H10T і в 3 рази для сталі 20 при солевмісті 17...180 мг/дм³. Тому для обох марок сталей для забезпечення припустимих значень швидкості високотемпературної корозії (0,3...0,25 мм/рік) рекомендується солевміст водомазутних емульсій нижче 180 мг/дм³. У цьому випадку забезпечується ресурс роботи поверхні нагріву до 100 тис. год.

При збільшенні солевмісту водомазутних емульсій у межах 17...490 мг/дм³ швидкість низькотемпературної корозії (рис. 3.14) перебуває на рівні 0,3...0,12 мм/рік при температурах стінки 70...130 °С, що нижче припустимого рівня корозії K_{ADD} навіть при $\tau = 100$ год.

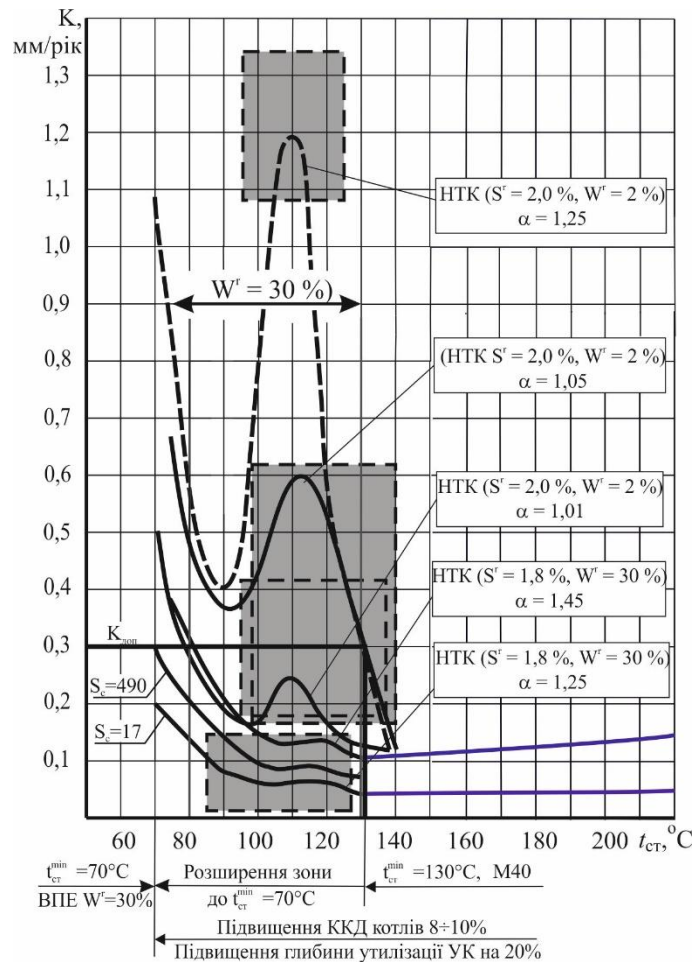


Рисунок 3.14 – Залежності швидкості низькотемпературної корозії K сталі 20 від температури метала $t_{ст}$ (при $\tau = 100$ годин)

Таким чином, підвищення солевмісту незначно впливає на швидкість низькотемпературної корозії внаслідок пасивації поверхні вуглецевої сталі оксидами азоту і тому припустимий солевміст водомазутних емульсій при забезпеченні K_{ADD} на рівні 0,2...0,3 мм/рік необхідно визначати по інтенсивності високотемпературної корозії. Ці залежності (див. рис. 3.10) дають можливість визначати мінімальні значення $t_{ст}$ при спалюванні водомазутних емульсій з водовмістом W^p на рівні 30 % при конкретних значеннях солевмісту і

прийняти рішення щодо можливості застосування конденсаційних поверхонь при розширенні значень $t_{ст}$ від 130 °С при спалюванні мазуту до 70 °С при спалюванні водомазутних емульсій з водовмістом $W^p = 30 \%$ при забезпеченні припустимої швидкості корозії K_{ADD} [101].

Спалювання водомазутних емульсій з водовмістом $\sim 30 \%$ і солевмістом до 180 мг/дм³ дозволяють підвищити максимально припустиме значення температури стінки $t_{ст}$ для сталі 20 на 10...15 °С і сталі 1X18H10T на 15...20 °С, при забезпеченні припустимої швидкості корозії K_{ADD} .

3.5 Дослідження кінетики корозійних процесів

Так як проведення досліджень корозійних процесів із значною тривалістю (1000 год та більше) на експериментальній установці викликає значні труднощі (а при забезпеченні сталості параметрів процесів горіння і корозії в такій тривалості немає необхідності), з метою оцінки інтенсивності низькотемпературної сірчаноокислотної корозії (НТК) при спалюванні водопаливних емульсій, а також порівняння НТК при спалюванні різних видів палив при змінних режимах спалювання доцільним буде проведення досліджень кінетики корозійних процесів. Для цього в газоході експериментальної установки одночасно розміщувалися корозійні зразки, які потім витягалися послідовно через певний час (2, 4, 6, 8, 12 год), що забезпечувало практично однакові умови впливу корозійного середовища з постійними параметрами а, отже, достатню відтворюваність умов проведення досвідів.

Для того, щоб при проведенні досліджень корозійних процесів при спалюванні ВПЕ на експериментальній установці забезпечити їх достовірність, спочатку були проведені дослідження при спалюванні стандартних палив для яких є літературні дані за результатами тривалих досвідів, проведених на

діючих котлах або лабораторних установках.

Для одержання залежностей кінетики корозійних процесів були проведені дослідження при спалюванні різних видів палив з різними α . Усього було проведено 25 серій вимірювань при вмісті S^p у паливі від 0,7 до 2,0 %, при $\alpha = 1,01 \dots 1,5$, вмісті води від 2,0 до 30,0 %: при спалюванні необводненого мазуту М100 ($W^p = 2$ %) з вмістом сірки 0,96 і 2 %, $\alpha = 1,01$; 1,025; 1,05 тривалістю до 100 год, а також ВПЕ на основі М40 з вмістом води 4, 10, 15, 17, 20 і 30 % при $\alpha = 1,5$; 1,45; 1,35; 1,2; 1,15. Для порівняння результатів корозійних випробувань при горінні ВПЕ і стандартного палива спалювався мазут М40 з упорскуванням води й пари в корінь факела. У топлення впорскувалася вода та вводилася пара в кількостях, еквівалентних водовмісту емульсії 30 %. характер кривой

Апроксимація експериментальних даних по зменшенню маси (глибини корозії) була проведена у вигляді степеневі залежності у вигляді $\Delta G_k = A\tau^n$, де A , n – постійні коефіцієнти для кожного режиму, які визначають характер кривої. На підставі отриманих даних можливо отримати апроксимаційні залежності кінетики корозії від часу впливу димових газів: убуток металу $\Delta G = f(\tau)$; швидкості корозії $K = f(\tau) = (\Delta G)'$; прискорення корозії $K' = f(\tau) = (\Delta G)''$, які дають можливість прогнозувати розвиток цих процесів.

Графіки та рівняння регресії, отримані в результаті обробки результатів експериментів, а також значення коефіцієнтів детермінації R при спалюванні ВПЕ із вмістом води 30 % ($S^p = 1,8$ %; $\alpha = 1,45$), при якому спостерігається мінімальна інтенсивність корозії, і при спалюванні стандартного палива (М40 + Ф12) ($S^p = 1,5$ %; $\alpha = 1,35$), при якому спостерігається максимальна корозія, представлені на рис. 3.15.

Як показали результати стендових досліджень, час стабілізації корозійного процесу, особливо при спалюванні ВПЕ, становить 2...3 години. Це дозволяє оцінити рівень корозійного процесу та прогнозувати його хід на

тривалий час за результатами досліджень кінетики протягом 2...12 годин. У перші 1...3 години процеси носять прискорений характер, а потім йдуть із уповільненням. Після 4...5 годин практично наступає динамічна рівновага, корозійний процес йде з майже постійною швидкістю. Це дозволяє розрахунковим шляхом при однакових умовах роботи спрогнозувати значення ΔG протягом будь-якого періоду експлуатації, але при забезпеченні стабільних режимів роботи.

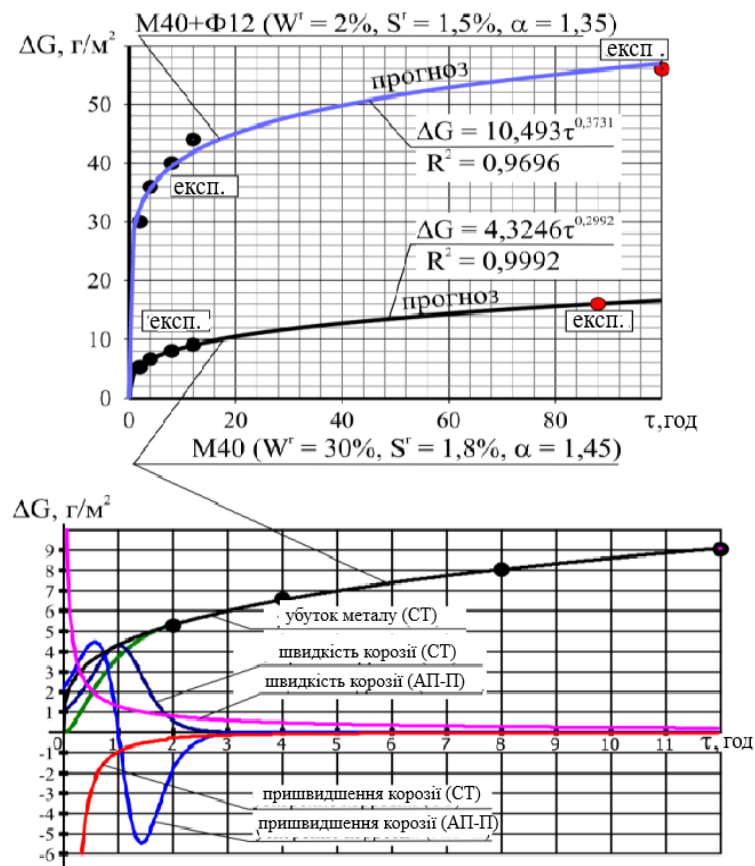


Рисунок 3.15 – Динаміка корозійних процесів: СТ – по степеневій функції;
АП-П – по аперіодичній функції 2-го порядку

Протягом перших 2 годин велике значення має точність вимірів ΔG і її вплив на оцінку ходу процесу. Якщо протягом цього часу значення ΔG перебуває на рівні точності вимірів 5,6 г/м², то «розгінна» ділянка закінчується при $\tau = 1...2$ год. Через різну інтенсивність корозії «розгінна» ділянка процесу не може на всіх режимах закінчуватися протягом однієї-двох годин. Тому необхідно оцінити вплив цієї початкової ділянки на остаточні значення ΔG ,

наприклад, протягом 8-годинних вимірів, тому що на їхній підставі здійснювалося порівняння впливу різних факторів (W^p в емульсії, S^p у вихідному паливі) на інтенсивність корозійних процесів.

Методика визначення часу релаксації (перехідного) процесу з обліком даних [102] і впливу початкової ділянки на результати прогнозу корозійного процесу протягом 2, 4, 8 і 12 год полягала в наступному. Спочатку оцінювалася відносна погрішність результатів досліджень корозії, якщо зневажити збитком убутком за перші 2 год впливу потоку димових газів (рис. 3.16).

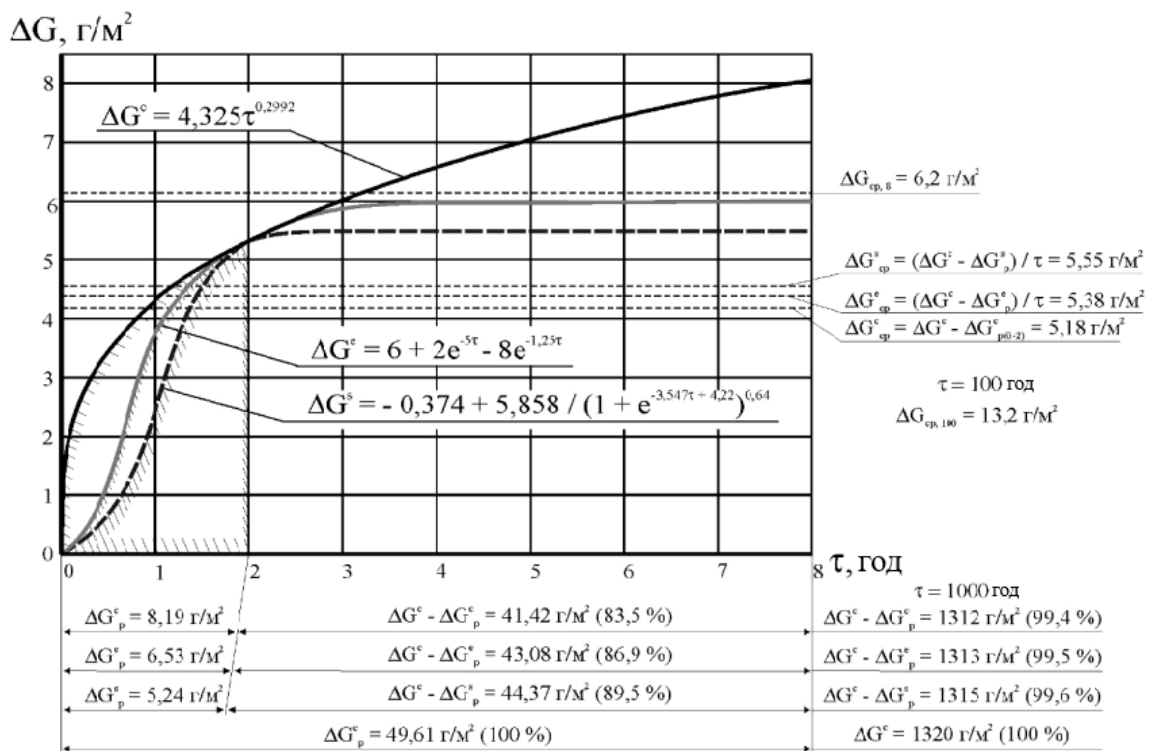


Рисунок 3.16 – Вплив інтенсивності корозії на початковій ділянці (від 0 до 2 год) на результати прогнозу розвитку корозійного процесу

Тоді при спалюванні ВПЕ на основі М40 ($S^p = 1,8 \%$, $W^p = 30 \%$) при $\alpha = 1,45$ відносна погрішність вимірів корозії за 8 годин складе 16,5 %, а відносна точність визначення ΔG – 83,47 %. Якщо перехідна функція визначається по знайденій аперіодичній функції другого порядку у вигляді залежності $\Delta G = 6 + 2\exp(-5\tau) - 8\exp(-1,25\tau)$, то відносна похибка – 13,1 %, відносна точність визначення убутку металу ΔG за 8 год – 86,9 %. Вплив

початкової ділянки при прогнозі розвитку корозії на 100 год буде значно меншим відносна погрішність – 0,62 %, точність – 99,4 %.

При аналізі відносної погрішності процесів корозії, що йдуть більш інтенсивно, величини погрішностей оцінки убитку металу більше, а точність визначення ΔG незначно менше. Так, при спалюванні стандартного мазуту (М40+Ф12) ($S^p = 1,5$ %; $W^p = 2,0$ %) при $\alpha = 1,35$ відносна погрішність вимірів дорівнює 18,9 %. Точність визначення ΔG складає 81,1 %. При урахуванні розвитку корозії на початковій ділянці по перехідній функції $\Delta\Theta = 33 + 11\exp(-5,56\tau) - 44\exp(-1,39\tau)$ відносна погрішність у цьому випадку складе 14,31 %. Точність визначення ΔG буде дорівнювати 85,7 %.

Якщо перехідний процес закінчується протягом 1-ої години, то погрішність визначення ΔG буде ще меншою. Таким чином, прогнозовані по степеневих залежностях показники убитку металу внаслідок НТК дають дещо завищені значення швидкості корозії (при τ до 8 год.) при урахуванні розвитку корозії на початковій ділянці від 0 до 2-х годин по сепенній залежності. Але в цьому випадку спостерігається прийнятний збіг прогнозованих значень ΔG з отриманими значеннями за більш тривалий час (наприклад, 100 год.).

Якщо оцінити середній убуток металу ΔG за час до 2-х годин за степеневою функцією, що апроксимує розвиток процесу, і протягом наступних годин, то тут буде спостерігатися максимальне значення ΔG_{2cp} . Тоді урахування цього значення на результати восьмигодинних досвідів, за якими здійснювалося порівняння швидкості корозійних процесів при спалюванні різних палив, буде мати максимальний вплив.

Так, при спалюванні ВПЕ на основі мазуту М40 ($S^p = 1,8$ %, $W^p = 30$ %), $\alpha = 1,45$, значення ΔG_{cp} , що визначається за степеневою залежністю за 8 годин, складає 49,61 г/м² при прогнозі на 100 годин – 1320 г/м². Якщо знехтувати значенням ΔG_{2cp} ($\Delta G_{2cp} = 8,19$ г/м²), тоді середнє значення убитку металу ΔG_{cp} за 8 годин дорівнює $49,6 - 8,19 = 41,41$ г/м². Відносна погрішність вимірів корозії

за 8 годин складе 16,5 %, а відносна точність визначення ΔG – 83,47 %.

Якщо перехідна функція визначається по знайденій аперіодичній функції другого порядку у вигляді залежності $\Delta G = 6 + 2\exp(-5\tau) - 8\exp(-1,25\tau)$, то значення ΔG_{2cp} складає 6,5 г/м². Тоді ΔG_{cp} за 8 годин дорівнює 43,1 г/м², відносна погрішність – 13,1 %, відносна точність визначення ΔG за 8 годин – 86,9 %.

Вплив початкової ділянки при прогнозі розвитку корозії на 100 годин стабільного впливу потоку димових газів буде ще меншим. Якщо не враховувати початкову ділянку за час 0...2 години, тоді середнє значення убутку металу за 100 годин буде дорівнювати 1311,8 г/м², а відносна погрішність складе 0,62 %. Точність визначення ΔG дорівнює 99,4 %. При врахуванні розвитку корозії на початковій ділянці за наведеною вище формулою перехідної функції відносна погрішність оцінки корозії за 100 годин уже складе тільки 0,49 %. Точність визначення ΔG за 100 годин – 99,5 %.

Якщо прийняти, що «розгінна» лінія йде по рівнянню кривої $\Delta G = -0,3742 + 5,858/(1 + \exp(-3,54\tau + 4,22))^{0,64}$, то площа під нею за 2 години буде 5,24 г/м², точність визначення ΔG 8-годинного дослідження буде складати 89,5 %, а прогнози на 100 годин – 99,6 %.

У розглянутих варіантах оцінки впливу початкової ділянки прийнято, що перехідний процес закінчується протягом 2-х годин, а через 3...4 години значення швидкості корозії стабілізується. Якщо вважати, що в початковій стадії корозійний процес проходить у кінетичному режимі, то закінчення цього процесу і перехід його в дифузійний режим може відбуватися по-різному залежно від швидкості кінетичного процесу, що і визначає з урахуванням росту шаруючи відкладень і продуктів корозії характер запізнювання процесу (розгінної кривої). При невеликій швидкості кінетичного процесу (пряма 1) (рис. 3.17) перехід у дифузійний режим може проходити двічі відносно

фактичної залежності $\Delta G = f(\tau)$: при невеликій тривалості τ_1 або при великій розгінній ділянці τ_2 . При максимально можливій швидкості процесу в кінетичному режимі (пряма 2) перехід у дифузійний режим з майже постійною швидкістю досягається в точці торкання прямої 2 з кривою «реальної» залежності $\Delta G = f(\tau)$ при τ_p , тобто при часі закінчення процесу релаксації (переходу на стабільний режим).

При $\tau < \tau_p$ швидкість корозійного процесу росте швидко і точність оцінки вимірів інтенсивності процесу безупинно підвищується. При $\tau > \tau_p$ точність вимірів продовжує зростати, але при більш повільному зростанні значень ΔG .

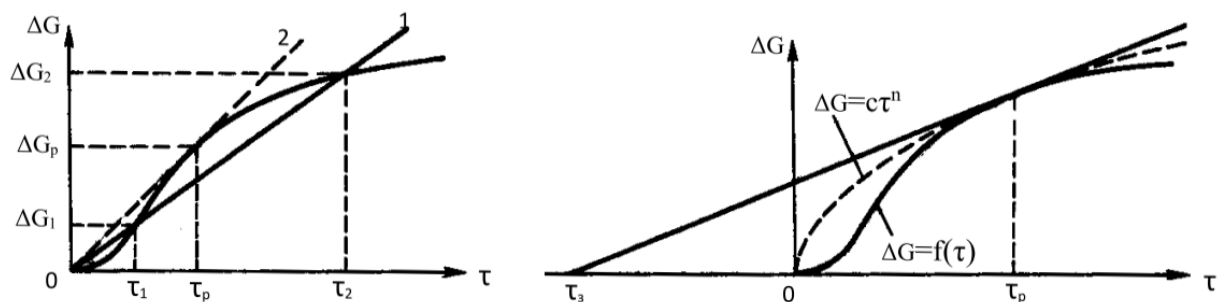


Рисунок 3.17 – Визначення часу релаксації τ_p

Час, при якому не вдається з достатньою вірогідністю оцінити убуток металу ΔG , вважаємо часом чистого запізнювання τ_3 , яке визначається граничним значенням $\Delta G_{\text{пр}} = 5,6 \text{ г/м}^2$, при якому досягається граничне значення погрішності вимірів швидкості корозії 10 % протягом першої години впливу потоку газів. Так як розвиток корозійного процесу в дифузійному режимі апроксимується за результатами вимірів при витратах часу 2, 4, 8 і 12 годин степеневою функцією $\Delta G = c\tau^n$, то час чистого запізнювання τ_3 визначається за формулою

$$\tau_3 = \sqrt[n]{\Delta G_{\text{пр}}/c} = \sqrt[n]{5,6/c}.$$

Результуюча інтенсивність розвитку початкової ділянки корозійного процесу визначається сумою часу чистого запізнювання τ_3 і часу релаксації τ_p

проходження процесу після закінчення.

Графічна побудова для визначення часу релаксації від кінетичного режиму до дифузійного, тобто часу «розгону» корозійного процесу, представлена на рис. 3.17. Так як точка торкання прямої залежно від часу τ_3 може розташовуватися на будь-якій ділянці «реальної» кривої розгінної ділянки $\Delta G = f(m)$, те на рисунку одночасно показана штрихова частина лінії $\Delta G = c\tau^n$, апроксимуюча ділянку фактичної кривої, що містить точку торкання. Тоді в точці торкання, дорівнюючи нахил дотичної $\Delta G/(\tau_3 + \tau_p)$ похідній $d\Delta G/d\tau = n c \tau^{n-1}$, отримуємо:

$$c \cdot \frac{\tau^n}{\tau_3 + \tau_p} = c \cdot n \cdot \tau_p^{n-1}.$$

Тоді

$$\tau_3 + \tau_p = \frac{\tau_p^n}{n \cdot \tau_p^{n-1}} = \frac{\tau_p}{n},$$

$$\tau_p = \frac{\tau_3}{\frac{1}{n} - 1} = \frac{\sqrt[n]{\frac{5,6}{c}}}{\frac{1}{n} - 1}.$$

З урахуванням часу впливу потоку димових газів на зразки в період установки в газохід й оптимізації параметрів після пуску димових газів з топлення в цей газохід протягом 10 хв. загальний час запізнювання буде дорівнює сумі $\tau_3 + 0,167$.

Тоді

$$\tau_p = \frac{\tau_3 + 0,167}{\frac{1}{n} - 1} = \frac{\left(\sqrt[n]{\frac{5,6}{c}} + 0,167 \right)}{\left(\frac{1}{n} - 1 \right)}.$$

Наведені значення погрішностей оцінки корозії отримані при мінімальній інтенсивності корозійного процесу, що спостерігається при спалюванні ВПЕ із вмістом води 30 %. При аналізі відносної погрішності процесів корозії, що йдуть із більшою інтенсивністю, величини погрішностей більше, а точність визначення ΔG незначно менше.

Висновки до розділу 3

1. Проаналізовано механізм виникнення високо- та низькотемпературної корозії. Основними факторами, що визначають характер ВТК є мінеральні сполуки палива, що викликають появу відкладень на поверхнях установок. Найбільш агресивними складовими є оксид ванадію (V_2O_5) та солі натрію (Na_2SO_4 , $NaCl$), також прискорює корозію наявність сполук хлору. Низькотемпературна корозія виникає при взаємодії металу з парами сірчаної кислоти, що утворюються при спалюванні сірчистих палив. Інтенсивність процесів НТК залежить від температури поверхні, вологості, концентрації сірчаної кислоти та розчинності продуктів корозії. Максимум швидкості корозії спостерігається при вологості 15-25 %, критична температура, при якій відбувається конденсація сірчаної кислоти складає $\sim 80^\circ C$.

2. Корозія є серйозною проблемою при спалюванні рідких важких та низькоякісних палив. Корозійні процеси можуть призвести до значного зношування та пошкодження котельних установок, елементів ДВЗ та ГТД. Тому необхідно розробляти та використовувати технології, що дозволяють знизити інтенсивність корозії та враховувати вплив мінеральної сполуки палива на корозію, розробляти методи її контролю.

3. Відсутність чітких вимог до якості води ВПЕ гальмує впровадження даної технології в енергетичних установках. Також існує обмежена кількість даних щодо інтенсивності ВТК і НТК при спалюванні водомазутної емульсії з

різним водо- і солевмістом.

4. Проведені експериментальні дослідження впливу мінеральної частини палива та води при спалюванні ВПЕ, температури поверхні металу та коефіцієнту надлишку повітря при різному солевмісті води. Дослідження проводилися для вуглецевої сталі 20 та нержавіючої сталі 1X18H10T при використанні мазуту М40 із вмістом сірки $S^p = 1,8 \%$. Кавітаційна обробка ВПЕ стабілізує рН емульсії, що важливо для зменшення корозії. Втрата активності води в емульсії спостерігається через ~ 300 хвилин, але дисперсність зберігається до двох тижнів.

6. Отримані залежності витрат водомазутної емульсій з водовмістом від 2 до 30 % і чистого палива, проведено порівняння з результатами інших дослідників. Встановлено, що економія чистого палива сягає 25 % при спалюванні ВПЕ у котлах з водовмістом 25...27 %. Максимальний рівень економії палива спостерігається при максимальному рівні активності кавітаційної підготовки емульсій.

7. Отримано залежності інтенсивності швидкості високотемпературної та низькотемпературної корозії сталей 20 та 1X18H10T при різному солевмісті та коефіцієнті надлишку повітря. Дослідження показали, що зі зменшенням солевмісту водомазутної емульсій швидкість високотемпературної корозії знижується. Підвищення солевмісту незначно впливає на швидкість низькотемпературної корозії внаслідок пасивації поверхні вуглецевої сталі оксидами азоту.

8. Дані залежності дають можливість визначати мінімальні значення температури стінки при спалюванні ВМЕ з водовмістом до 30 % при конкретних значеннях солевмісту і оцінити можливість застосування конденсаційних поверхонь за умов забезпечення припустимої швидкості корозії.

9. В результаті обробки експериментальних даних отримані регресійні

рівняння, які дозволяють прогнозувати інтенсивність корозії при використанні ВПЕ та чистих палив. Проведена оцінка погрешностей отриманих рівнянь.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛСІЇ В КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

4.1 Конструктивні рішення для підвищення ефективності роботи котлів на мазуті з урахуванням впливу корозії на поверхні нагріву

У зв'язку з низькими швидкостями низькотемпературної корозії (див. рис. 3.14) і появою можливості установки конденсаційних поверхонь із температурами стінки $t_{ст}$ в межах 130...70 °С (що нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти) при спалюванні ВМЕ з водовмістом W^f на рівні 30 % і солевмістом від 17 до 490 мг/дм³ розроблено відповідні конструктивні схеми промислових (опалювальних) і утилізаційних котлів [35].

Базовим варіантом для порівняння прийнята конструкція котла при спалюванні мазуту, у якому використовуються тільки сухі конвективні поверхні при температурах стінки вище 130 °С. У цьому випадку температура газів, що йдуть, складає $\vartheta_{від} \geq 140...160$ °С, а ККД промислових (опалювальних) котлів знаходиться на рівні $\eta_{пк} = 80...85$ %. При спалюванні стандартних сірчистих мазутів для підвищення ККД котлів встановлюються конвективні поверхні (економайзер, повітропідігрівач) із $t_{ст}$ вище 130 °С (рис. 4.1, а), так як утилізація прихованої теплоти конденсату дозволяє досягти майже стовідсоткового значення ККД при його розрахунку по Q_n^p .

З урахуванням того, що при спалюванні ВПЕ з $W^p \approx 30$ % значення $t_{ст}$ знаходиться на рівні 70 °С, то з'являється можливість встановити додатково до сухої поверхні конденсаційну поверхню економайзера (рис. 4.1, б), що забезпечує конденсацію частини пари H_2SO_4 і підвищення ККД допоміжних котлів на 8...10 % (в утилізаційних котлах забезпечується можливість підвищення глибини утилізації до 65 %, що призведе до зменшення рівня теплових викидів у 1,6 рази).

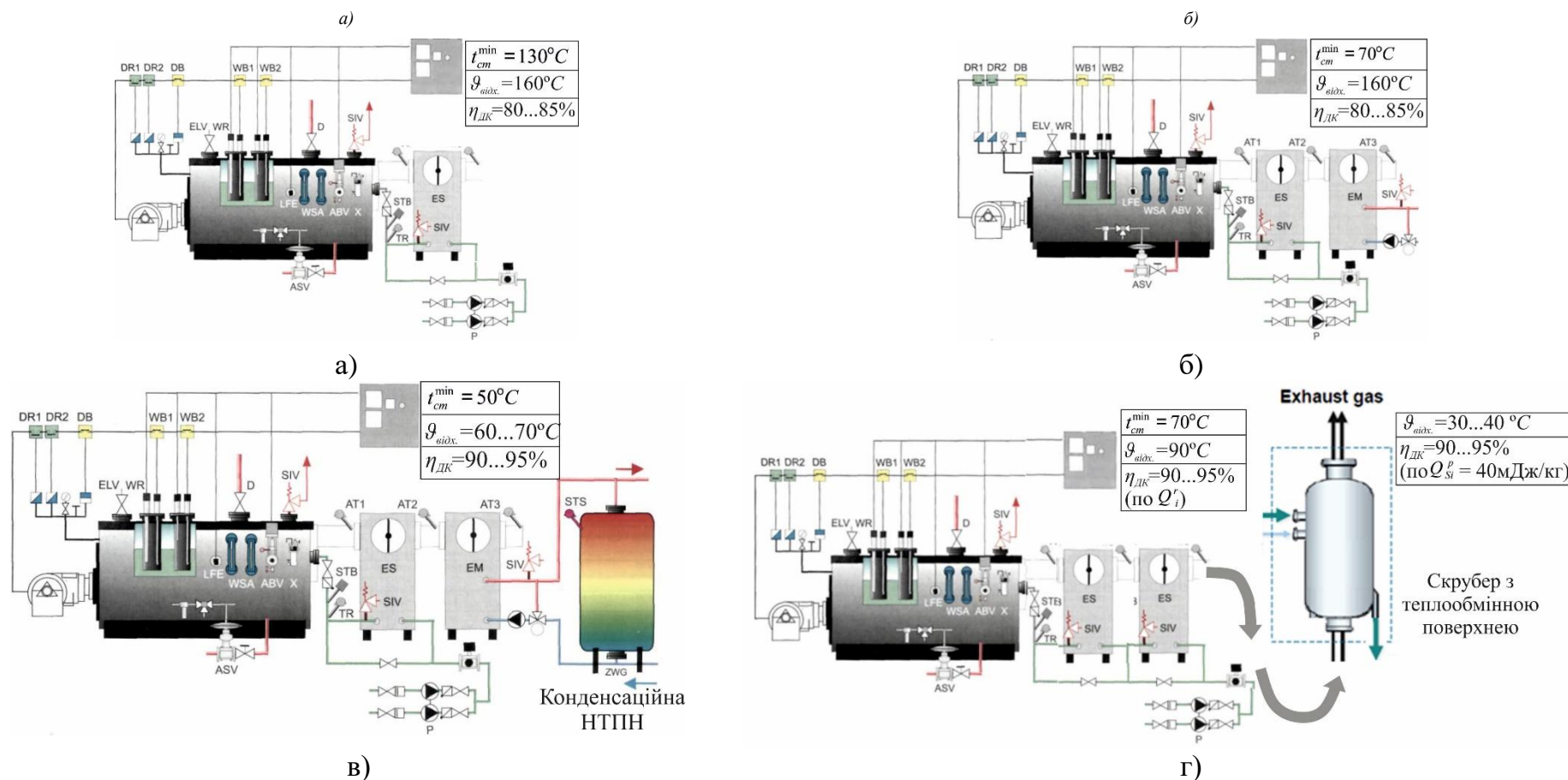


Рисунок 4.1. Варіанти конструктивних схем допоміжних котельних установок:

а) з сухим економайзером, $t_{ct} = 130^{\circ}C$, $t_{відх} = 160^{\circ}C$; б) з сухим економайзером і конденсаційною низькотемпературною поверхнею нагріву (НТПН) для конденсації пари H_2SO_4 , $t_{ct} = 70...80^{\circ}C$, $t_{відх} = 90^{\circ}C$; в) з сухим економайзером і конденсаційною НТПН для конденсації пари H_2SO_4 і H_2O , $t_{ct} = 50^{\circ}C$, $t_{відх} = 60...70^{\circ}C$; г) з сухим економайзером і конденсаційною НТПН для конденсації пари H_2SO_4 і скрублером для конденсації водяної пари, $t_{відх} = 30...40^{\circ}C$

Але при цьому не спостерігається конденсація водяної пари, концентрація якої в газах значно більша при спалюванні ВПЕ. Для забезпечення процесу конденсації водяної пари при $t_{\text{ст}}$ менше $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ необхідно використання поверхні нагріву з нержавіючої сталі. Тоді конвективні поверхні котлів будуть складатися із сухої частини (при $t_{\text{ст}}$ до $130\text{ }^{\circ}\text{C}$), конденсаційної частини для конденсації H_2SO_4 (при $t_{\text{ст}}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$), а також конденсаційної частини із нержавіючої сталі для конденсації водяної пари (при $t_{\text{ст}}$ до $30\ldots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рис. 4.1, в).

У зв'язку з тим, що пропонується застосування скрубєрних технологій, то можна скористатися можливістю забезпечити конденсацію H_2O у скрубєрі. Тоді замість конденсаційної поверхні із нержавіючої сталі рекомендується установка скрубєра з насадкою, яку необхідно виконувати з некорозійного матеріалу (кераміка, кислотостійка пластмаса) [103].

Конструктивні рішення установки теплообмінних поверхонь у скрубєрі представлені на рис. 4.2.

Насадка скрубєра зрошується тим же розчином католіту, що активований в кавітаторі для інтенсифікації процесу абсорбції. Температура цього католіту повинна бути нижче температури точки роси водяної пари димових газів. При спалюванні ВПЕ з $W^p = 30\%$ її значення знаходяться на рівні $50\ldots 53\text{ }^{\circ}\text{C}$ (парціальний тиск водяної пари – 15 кПа). Тут буде забезпечена конденсація водяної пари, що (додатково до теплоти абсорбції) супроводжується виділенням великої кількості теплоти. Наслідком цього є те, що вода на виході із насадки після перемішування з потоком газів підігрівається до $80\ldots 90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В стаціонарній енергетиці з метою забезпечення надійності роботи газоходів і димової труби для боротьби з вологістю димових газів при їх низькій температурі, що має місце при встановленні конденсаційних економайзерів, застосовуються теплові методи захисту газовідвідного тракту.

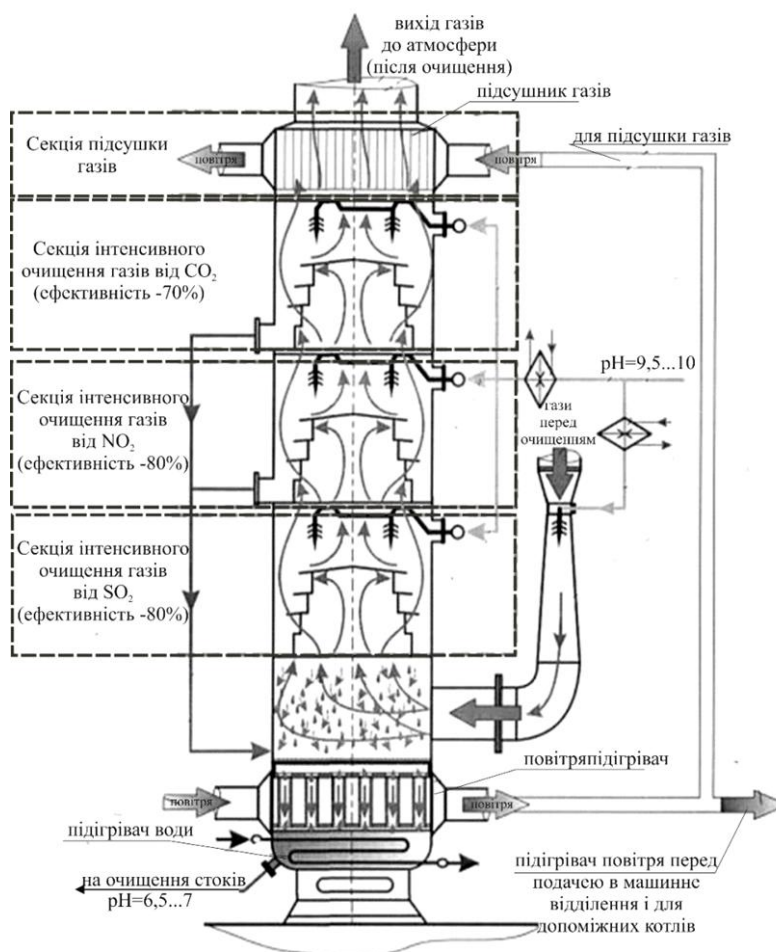


Рисунок 4.2 – Схема трисекційного мокрого скрубера з підігрівом повітря і підсушкою газів гарячим повітрям

Це – байпасування відхідних газів з високою температурою для підмішування і підвищення температури газів (але при цьому зростає вологість газів і знижується ефективність утилізації теплоти); підмішування гарячого повітря, що зменшує вологовміст відхідних газів (при наявності повітропідігрівача); застосування спеціального обладнання для підсушки газів, внаслідок чого знижується їх вологість.

В даній технології пропонується додатково два можливі варіанти виконання цієї технологічної операції.

У випадку спалювання у дизель-генераторах малосірчистого палива (з $S^p < 0,5 \%$) можливо використовувати теплоту цих газів для підсушки димових газів після інших агрегатів. При підсушці газів вихлопними газами

зникне конденсат на внутрішній поверхні газоходів після скрубера, що знизить інтенсивність корозії цих поверхонь і забезпечить надійність і довговічність їх експлуатації. Для того, щоб збільшити глибину утилізації теплоти вихлопних газів дизель-генераторів (ДГ), в камерах глушників розміщуються поверхні підігріву води для котлів і для системи гарячого водопостачання, що забезпечить економічність енергетичної установки в цілому за рахунок повної утилізації теплоти газів двигунів і збільшення глибини утилізації вихлопних газів ДГ.

У випадку спалювання сірчистих палив з $W^p = 2 \%$ або ВПЕ ($W^p = 30 \%$) можлива підсушка газів за рахунок теплоти гарячої води, що одержана в підігрівачі системи гарячого водопостачання.

Таким чином, застосування скрубєрних технологій дозволить забезпечити майже 100 % утилізацію теплоти конденсації пари сірчаної кислоти і водяної пари при надійній роботі конденсаційних поверхонь котлів і їх газоходів, а також газоходів до і після скрубєрів.

У судових енергоустановках використання електродіалізного опріснювання (ЕДО) забортної води для підготовки води необхідної якості для ВПЕ надає можливість комплексного використання продуктів цієї технології: ділюату у схемі для кавітаційного приготування ВПЕ, а католіту – для зрошення скрубєрів, що надає можливість використання теплоти конденсації пари H_2SO_4 і H_2O та забезпечує підвищення еколого-економічних показників енергоустановок.

Для підвищення ефективності ЕДО пропонується встановлення додаткових електродів у між мембранному просторі апарату. Як показали результати досліджень, установка додаткових електродів з подачею на них незначного потенціалу (на рівні 5...6 В), що значно менше потенціалу, що підводиться на зовнішні електроди (до 50 В), дає можливість забезпечити підвищення коефіцієнту виходу по струму на 25 %. Економічне використання ЕДО найбільш ефективне при продуктивності додаткової знесолювальної

установки до $10 \text{ м}^3/\text{год}$, що менше необхідних витрат на опріснення на любых типах суден і навіть при їх водотонажності на рівні 200...300 тис. т (рис. 4.3).

На основі проведених досліджень з урахуванням статистичних даних з витрат палива, води для різних типів суден (на прикладі танкерів та нафторудовозів) побудовані залежності витрат палива при спалюванні ВПЕ і економії паливоенергетичних ресурсів B .

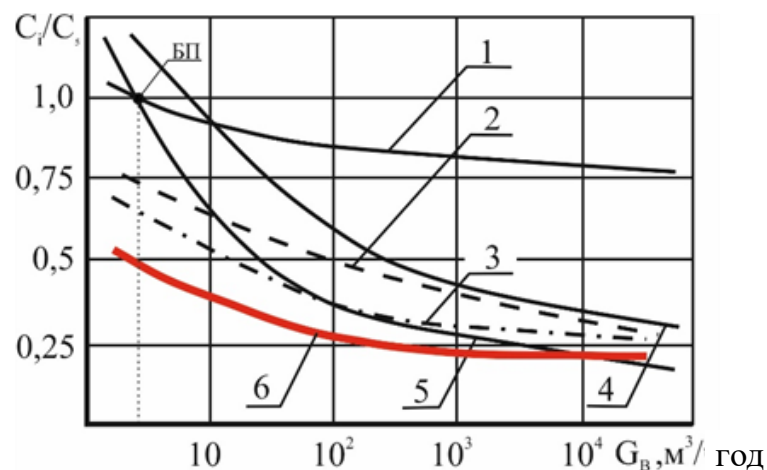
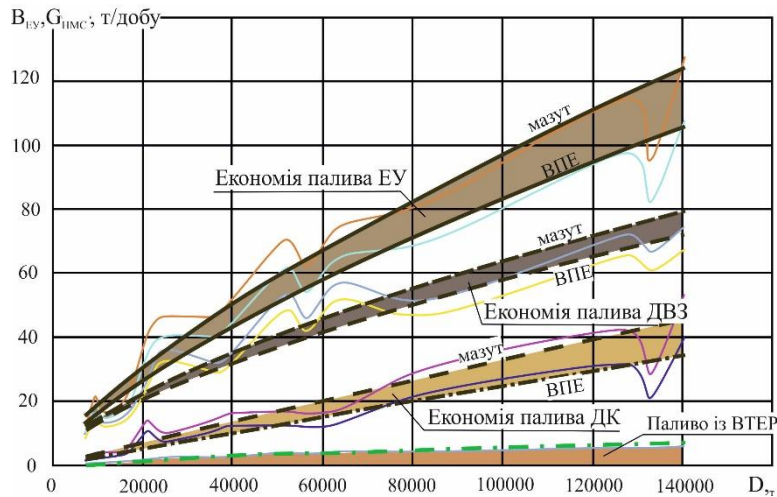


Рисунок 4.3 – Залежність відносної вартості знесолоної води від продуктивності G_b системи водопідготовки (знесолення: 1 – на іонообмінних фільтрах; 2 – в осмотичних модулях та іонообмінних фільтрах; 3 – в електродіалітичних апаратах та іонообмінних фільтрах; 4 – у випаровувачах; 5 – в осмотичних модулях та випаровувачах; 6 – в електродіалітичних апаратах з додатковими електродами)

Це – до 8 % економії палива в ДВЗ [104], до 25% – для допоміжних котлів суднових енергоустановок, а також за рахунок використання ВТЕР: нафтозалишків – 0,5 % дедвейту танкерів і 0,4 % витрати палив дизельних двигунів при сепарації (рис. 4.4).

При використанні скрубберних технологій, коли необхідно істотно знизити рівень викидів токсичних речовин, замість поверхні з нержавіючої сталі можлива установка теплообмінника на виході з мокрого скрубера при доведенні зрошеного розчину католіту до рівня рН 6,5...7,0, що дозволяє підвищити

ККД котла більше 100 % (при його визначенні по нижчій теплоті згоряння). У цьому випадку температура газів, що йдуть складає 30-40 °С.



Паливо – ВПЕ на основі мазуту М40; ДВЗ – ВПЕ (М40 + 20% H_2O), ДКУ - ВПЕ (М40 + 30% H_2O)

$$B_{EY} = 0,0254x^{0,7168}, R^2 = 0,9472;$$

$$B_{eEY} = 0,0247x^{0,7057}, R^2 = 0,9458;$$

$$B_{ДВЗ \text{ сум}} = 0,0439x^{0,6328}, R^2 = 0,924;$$

$$B_{eДВЗ \text{ сум}} = 0,04x^{0,6328}, R^2 = 0,924;$$

$$B_{ДК} = 0,0006x^{0,948}, R^2 = 0,9301;$$

$$B_{eДК} = 0,0005x^{0,948}, R^2 = 0,9301;$$

$$G_{HMBB} = 0,0036x^{0,634}, R^2 = 0,9234.$$

Рисунок 4.4 – Використання паливо-енергетичних ресурсів різними транспортними засобами

Підвищення глибини утилізації теплоти вихлопних газів до 65 % в утилізаційних котлах когенераційних установок забезпечується також за рахунок установки конденсаційних поверхонь, (економайзерів, секції гарячого водопостачання), що приведе до зменшення рівня теплових викидів у 1,6 рази. На основі проведених наукових досліджень розроблена технологія комплексного використання паливно-енергетичних і водних ресурсів при використанні електродіалісної обробки води, блок-схема якої представлена на рис. 4.5.

Відмінною рисою цієї технології є застосування кавітаційної обробки різного рівня інтенсивності на всіх етапах попередньої підготовки прісної води, палива та нафтомасловмісних вод перед змішуванням у кавітаторі. Легка (м'яка) кавітаційна обробка морської або солоної води перед першим та іншими модулями електродіалісної установки створює у воді більш деформовані пухирці, які забезпечують їхню полірувальну дію (а не кавітаційне руйнування

поверхні мембран) [105].

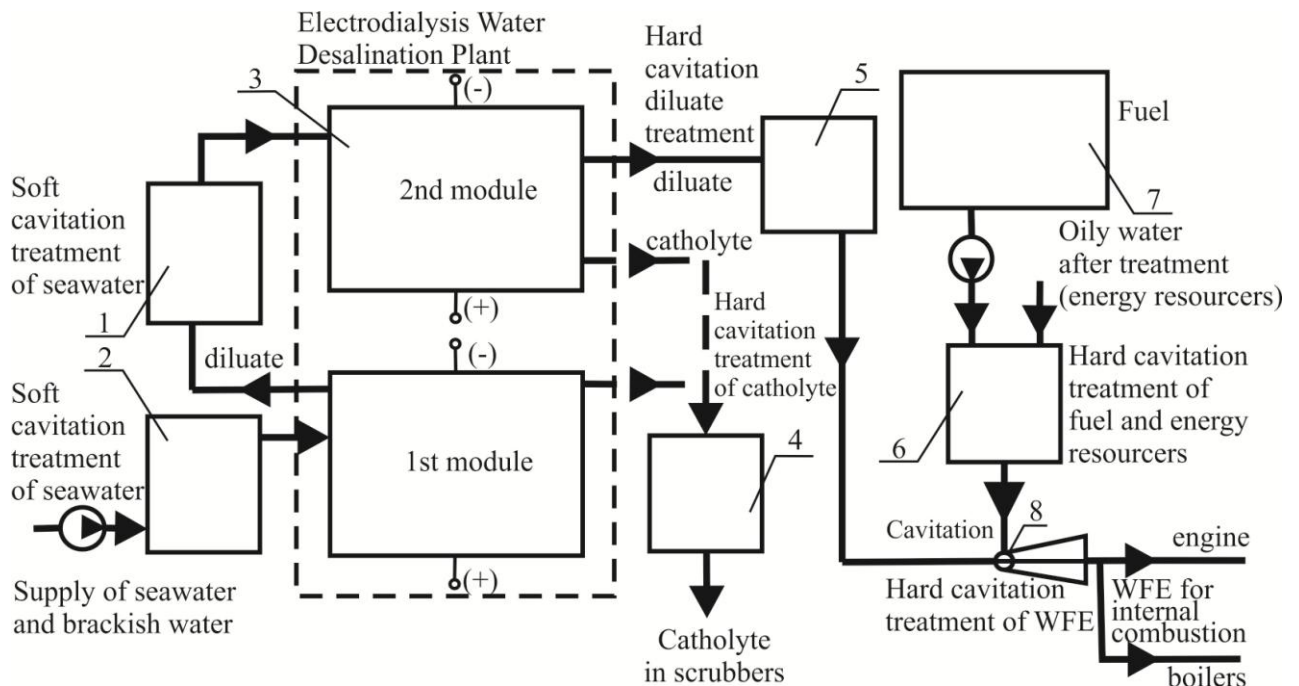


Рисунок 4.5 – Блок-схема технології процесу комплексного використання паливно-енергетичних і водних ресурсів: 1, 2 – блок-схема легкої кавітаційної обробки води, 3 – електродіалізна водоопреснювальна установка, 4, 5, 6 – блок-схема важкої кавітаційної обробки води і палива, 7 – паливна цистерна, 8 – кавітатор (гомогенізатор)

Католіт першого й другого модулів проходить тверду кавітаційну обробку, що підвищує його абсорбційні властивості, а потім подається на зрошення скрубєрів і циклонів. Знесолений у двох модулях ділюат також піддається твердій кавітаційній обробці та далі подається у гомогенізатор. Підігріте до 90 °С паливо, на основі якого готується водопаливна емульсія, надходить у блок твердої кавітаційної обробки, в який підводять нафтомасловмісну воду, що попередньо обробляється з метою зменшення солемісту. У гомогенізаторі проводиться завершальна жорстка кавітаційна обробка водомазутної емульсії для підтримки попередньо досягнутого необхідного рівня концентрації реакційно-активних вільних електронів і радикалів води та палива (за рахунок їх жорсткої кавітаційної обробки), що забезпечує максимальну активність

водомазутної емульсії перед безпосередньою подачею до форсунок.

Така технологія підготовки водомазутної емульсії не вимагає істотної реконструкції паливної системи для двигунів внутрішнього згоряння і котлів з огляду на те, що в сучасних системах підготовки палива використовуються гомогенізатори.

У технології передбачене використання води після продувки котлів та оброблених стічних вод з лужними властивостями, які сприяють ресурсозбереження й зменшення викидів, а також відведення надлишку ділюату в цистерну дистиляту для забезпечення запасу прісної води.

Кінцеве значення водо- та солевмісту водомазутної емульсії контролюється перед подачею її до котлів або двигунів внутрішнього згоряння. Досягнута в такий спосіб максимальна активність водопаливної емульсії з водовмістом $\sim 30\%$ приводить до створення співвідношення $\text{NO}_2:\text{NO}$ в димових газах на рівні 0,33, яке забезпечує зниження інтенсивності низькотемпературної корозії, а також емісії токсичних інгредієнтів завдяки інтенсифікації процесу абсорбції. Внаслідок цього забезпечується інтенсивне поглинання NO_x і SO_2 конденсатом H_2SO_4 з концентрацією 57 % на конденсаційних поверхнях нагріву та газоходів до скрубберної частини за умов забезпеченні умов надійної роботи їхнього металу шляхом підтримки температури стінки на рівні 80°C .

Експериментальні дослідження показали (рис. 4.6), що внаслідок спалювання кавітаційно-підготовленої ВМЕ з водовмістом близько 30 % (первинний метод) забезпечується на виході з камери згоряння (у порівнянні зі спалюванням мазуту) зниження NO_x у 3,2 рази (з 533 до 167 мг/м^3), SO_2 у 2,5 рази (з 449 до 183 мг/м^3) і CO_2 у 1,4 рази від 12,2 до 8,5 об. %, в той час як при упорскуванні водяної пари у зону активного горіння в кількості, що відповідає водопаливної емульсії з $W^p = 30\%$, викиди NO_x і SO_2 більш високі.

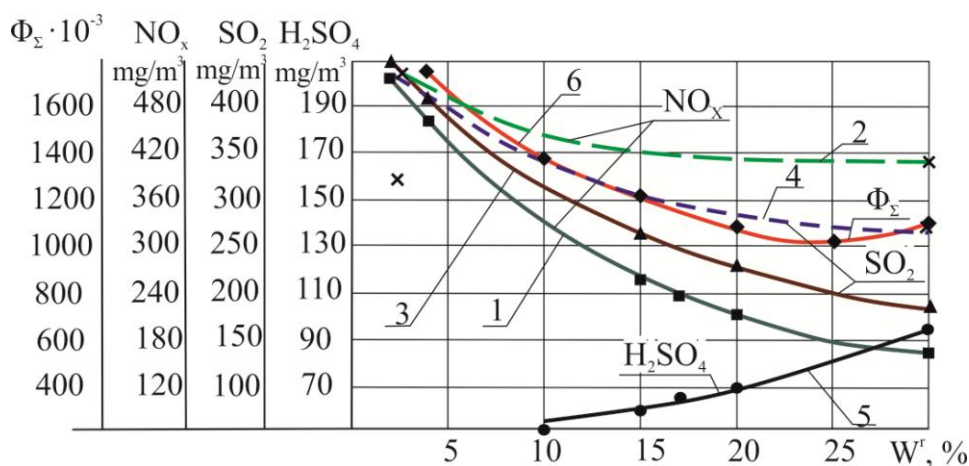


Рисунок 4.6 – Залежність емісії SO_2 , NO_x , H_2SO_4 від водовмісту водопаливної емульсії W^p і способу вприскування води (пари) : 1 – водомазутна емульсія, 2 – мазут М40 + водяна пара; 3 – водомазутна емульсія, 4 – мазут М40 + водяна пара; 5 – пара сірчаної кислоти H_2SO_4 ; 6 – сумарна токсичність Φ_{Σ}

Внаслідок поліпшення абсорбційних властивостей димових газів розміри секції скрубера для абсорбції NO_x зменшаться у 3...4 рази, а секції абсорбції SO_2 з урахуванням росту інтенсивності абсорбційних процесів SO_2 по нітрозному механізму, зменшаться у 5...8 разів. Розміри секції абсорбції CO_2 зменшаться у 1,4 рази за рахунок зменшення частки органічної частини водопаливної емульсії (30 % води + 70 % мазуту) (рис. 4.7) [106].

4.2 Вплив способів введення води в полум'я на ефективність горіння і викиди оксидів азоту при спалюванні ВПЕ

Дослідження впливу впорскування водяної пари і спалювання ВПЕ на процеси горіння, емісію NO_x , SO_2 проводилися на експериментальній установці, що забезпечує стабільність параметрів горіння, при спалюванні необхідного мазуту М40 ($S^p = 1,8\%$, $W^p = 2\%$), при вприскуванні водяної пари до кореня факела в кількості, що відповідає 30 % ВПЕ, і при спалюванні водомазутної емульсії на основі цього мазуту з водовмістом W^p , рівними 15 і 30 % при коефіцієнтах надлишку повітря α в межах 1,22...1,26 [107]. Усі

дослідження були виконані для мазуту М40 з використанням однієї проби палива, що забезпечило однаковий склад органічної частини ВПЕ і надало можливість визначення впливу способу вприскування води (пари) і водовмісту ВПЕ на ефективність горіння і вихід оксидів азоту в камері згорання (КЗ).

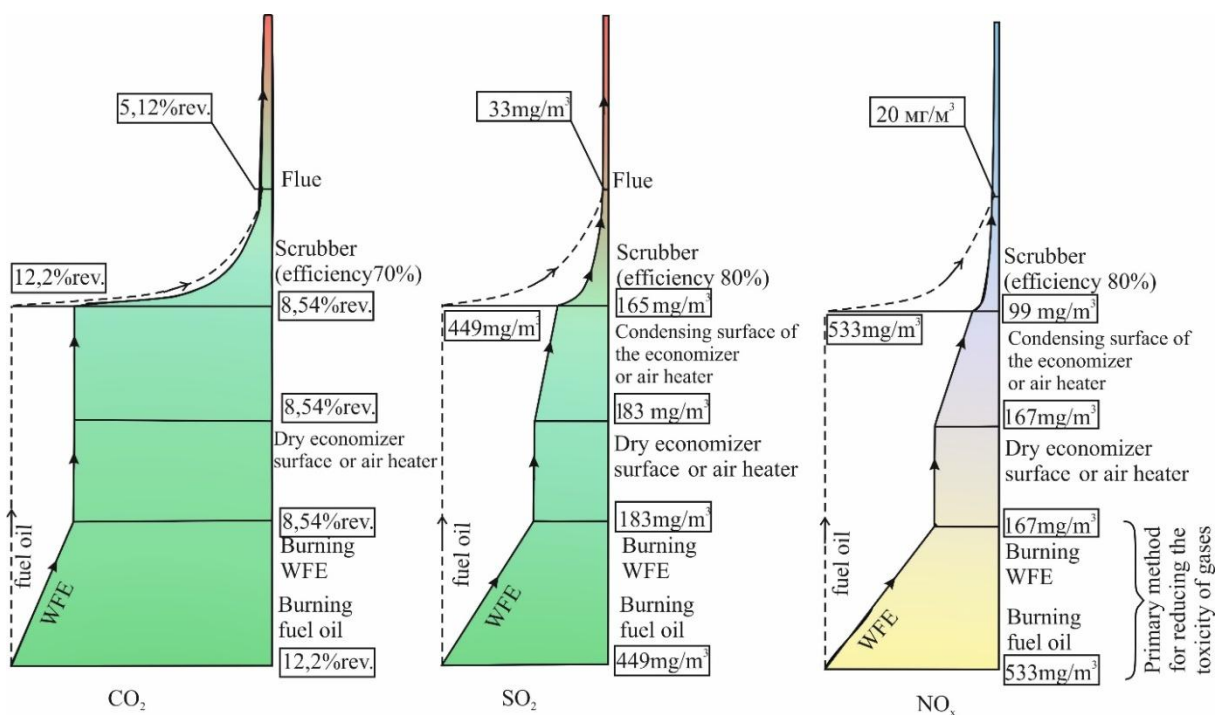


Рисунок 4.7 – Зниження викидів шкідливих речовин при спалюванні водомазутної емульсії із застосуванням скрубберної технології для котлів

Розподіл температур газів по довжині і поперечному перетину КЗ визначався за допомогою платино-родієвої термопари, корольок якої розміщувався на вході газів у зонд, що охолоджувався водою. Точність вимірювань температур складала ± 5 °С. За допомогою цього ж зонду забезпечувався ізокінетичний режим відбору газів на аналіз складу.

Контроль якості горіння мазуту, дизельного палива, ВПЕ на їх основі контролювався за допомогою хроматографа Газохром-3101 (вимірювання концентрації Н₂, СО, СН₄, О₂ по довжині і перетину КЗ з метою визначення ефективності горіння, оцінки продуктів недопалу і визначення втрати теплоти від хімічного недопалу q_3) і газоаналізатора ОКСИ-5М з метою визначення

концентрації O_2 (і відповідно коефіцієнту надлишку повітря α при горінні), а також концентрації токсичних викидів SO_2 , NO_x (окремо NO і NO_2). Гранична чутливість цих газоаналізаторів (в об. %) знаходиться на рівнях: $5 \cdot 10^{-4}$ по H_2 ; $1 \cdot 10^{-3}$ по CO і CH_4 , SO_2 , NO_x і $2 \cdot 10^{-3}$ по O_2 . Відносна похибка складає $\pm 5\%$.

Результати досліджень якості горіння ВПЕ і впливу кількості ($H_2 + CO$) на вихід оксидів азоту NO_x і їх складових NO_2 і NO представлені на рис. 4.8, а-е.

При спалюванні мазуту (див. рис. 4.8, а) отримані найменші концентрації H_2 і CO та їх суми ($CO + H_2$) із усіх розглянутих режимів. Причому концентрація CO мало змінюється по довжині КЗ внаслідок недостатньої кількості H_2 і H_2O , що уповільнює хід реакцій окислення CO до CO_2 , незважаючи на менше значення максимальної температури газів $1855^\circ C$, що мало б знижувати концентрацію NO_x . Мінімальний вплив відновлювальних властивостей ($CO + H_2$) сприяє зростанню концентрації NO_x до максимального значення 532 мг/м^3 .

При цьому необхідно врахувати відсутність впливу чинників, що призводять до зниження викидів NO_x , які з'являються при спалюванні ВПЕ. У результаті меншої ефективності передполум'яних процесів (особливо процесів сумішоутворення) максимум температури газів t знаходиться в перетині, розташованому на 0,4 довжини КЗ. На виході з КЗ концентрації CO , CH_4 , H_2 є відносно високими, що призводить до зростання втрати теплоти від хімічної недопалу q_3 на рівні 1 %.

Значення співвідношення $NO_2:NO = 0,143$ і є найменшим з розглянутих режимів, що не забезпечує пасивацію поверхонь нагріву з температурою стінки $t_{ст}$ нижче $130^\circ C$. У зв'язку з цим спостерігається зростання низькотемпературної кислотної корозії (НТК) з появою її «піку» на рівні 1,2 мм/рік при $t_{ст}$ близької до $110^\circ C$, що обмежує температуру відхідних газів на рівні $150...160^\circ C$.

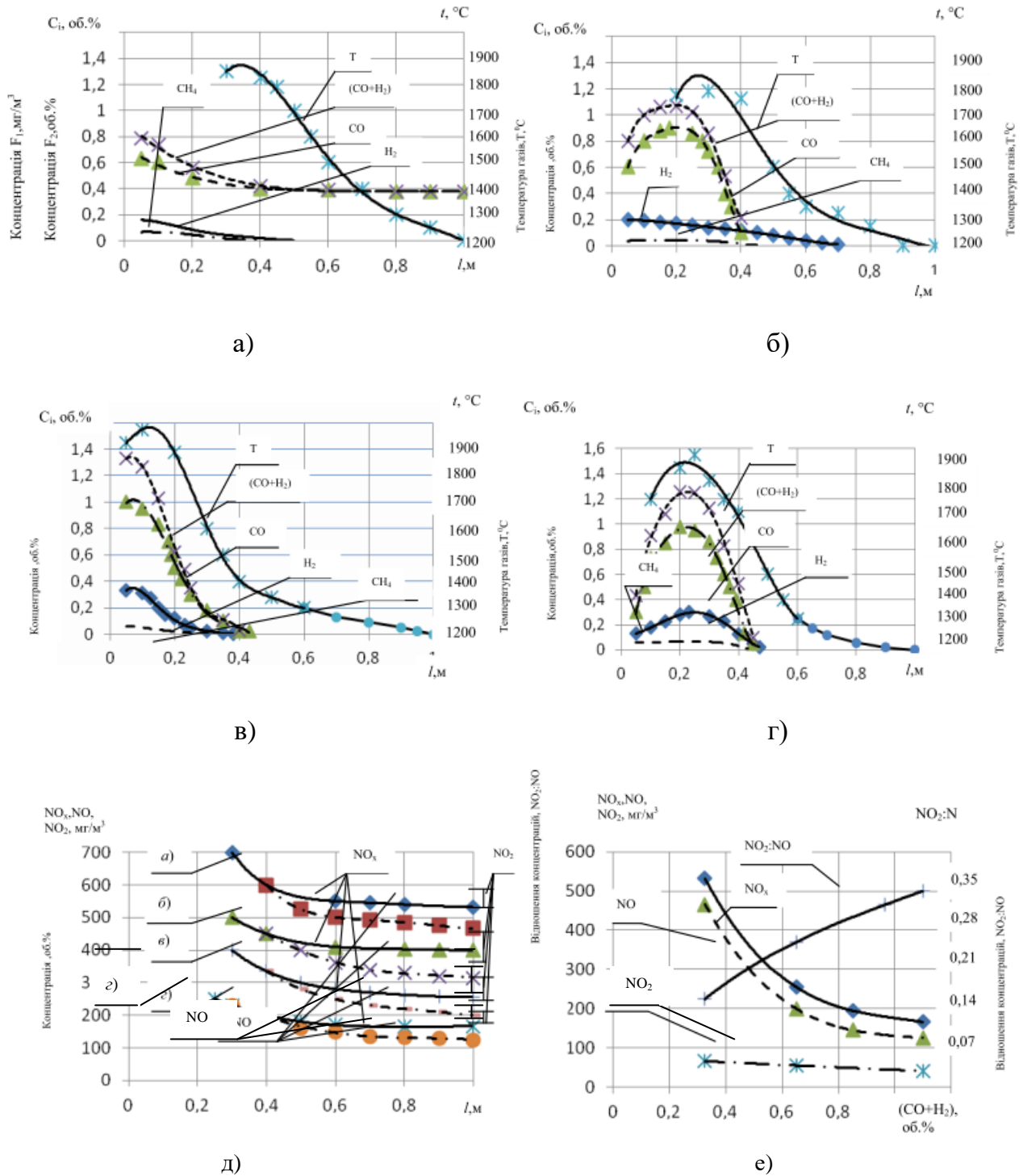


Рисунок 4.8 – Результати експериментальних досліджень якості горіння по концентрації CO , H_2 , CH_4 , $(CO + H_2)$ і викидів NO_x (NO , NO_2 , $NO_2:NO$) з урахуванням розподілу температур газів t : а) при спалюванні мазуту М40 ($S^p = 1,8 \%$; $W^p = 2,0 \%$); б) при вприскуванні водяної пари на рівні $W^p = 30 \%$; в) при спалюванні ВПЕ з $W^p = 15 \%$; г) при спалюванні ВПЕ з $W^p = 30 \%$; д) розподіл концентрацій NO_x , NO , NO_2 по довжині КЗ відповідно режимам а)-г); е) залежність концентрацій NO_x , NO , NO_2 і співвідношення $NO_2:NO$ від концентрацій $(CO + H_2)$

Тому при спалюванні сірчистих мазутів рівень ККД котлів знаходиться нижче 85 %, а також можна констатувати обмежений рівень глибини утилізації теплоти вихлопних газів ДВЗ.

При вприскуванні до кореня факела кількості водяної пари, еквівалентної 30 % ВПЕ (див. рис. 4.8, б), концентрація H_2 і CO та їх сума зростає, а максимальна температура газів знижується до 1820 °С. Тому під впливом цих двох чинників концентрація NO_x знижується в 1,33 рази у порівнянні з спалюванням мазуту та збільшується до 0,268 значення співвідношення $NO_2:NO$. Внаслідок поліпшення процесу горіння максимум температури газів спостерігається ближче до зрізу пальника. Однак у зв'язку з відсутністю впливу чинників, властивих процесу горіння ВПЕ (мікровибухи, плазмовий режим, ангармонічного акустичне поле, відновлювальні властивості атомів водню), при цьому не досягається рівень режимів спалювання ВПЕ.

При спалюванні ВПЕ з $W^p \approx 15\%$ (див. рис. 4.8, в) якість горіння є вищою. Максимальні концентрації CO і H_2 (отже, і $(CO+H_2)$), є більшими і спостерігаються на найближчій відстані від зрізу пальника (~70 мм) з усіх розглянутих режимів внаслідок перевищення кількості теплоти, що виділяється, над витратами теплоти газів на випаровування води ВПЕ та її піроліз. Максимум температур газів знаходиться на відносній відстані 0,07 довжини КЗ і досягає 1950 °С, що мало б привести до зростання концентрації NO_x . Але завдяки більшому впливу відновлювальних властивостей збільшеної суми $(CO+H_2)$ концентрація NO_x знижується. Так як при спалюванні ВПЕ створюються умови для проходження мікровибухів її крапель і плазмового механізму горіння, то додатково починають впливати сильні відновлювальні властивості атомів водню H_1^1 , що супроводжуються реакціями рекомбінації з виділенням теплоти на рівні 400 мДж/моль і миттєвим зростанням температури, яка потім різко знижується через витрати теплоти на ендотермічні реакції дисоціації. Потім під впливом мікровибухів після енергійного перемішування продуктів рекомбінації з іншим потоком продуктів згорання встановлюється

середня температура газів з максимальним значенням $1950\text{ }^{\circ}\text{C}$. На цій локальній ділянці відбувається перший етап термічного розкладання NO_x зі швидкістю на рівні 10^7 K/s . Після цього спостерігається друга ділянка різкого зниження температури газів до $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ внаслідок високих швидкостей реакцій горіння і витрат певної кількості теплоти на реакції дисоціації CO_2 і H_2O , а також інтенсивного променистого теплообміну. Згідно з даними [102] під впливом відновлювальних властивостей ($\text{CO} + \text{H}_2$) проходить процес термічного розкладання NO_x з меншою швидкістю на рівні $105\ldots 103\text{ K/s}$. На наступній ділянці КЗ при зниженні температури газів з 1600 до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ на виході газів з камери практично припиняється процес термічного розкладання NO_x .

При розгляді послідовно по довжині КЗ процесів термічного розкладання NO_x необхідно врахувати вплив ангармонічного процесу горіння ВПЕ (внаслідок проходження мікрровибухів) на встановлення відношення часу проходження реакцій до часу досягнення рівноважної концентрації NO_x , яке значно менше у зв'язку зі збільшенням швидкості реакцій під впливом акустичних ангармонічних коливань (за аналогією з процесами пульсаційного горіння), а також вплив зростання суми концентрації ($\text{CO} + \text{H}_2$) на зв'язування N_2 повітря активними радикалами CH , CH_2 [54].

Таким чином, при зазначеному одночасному проходженні чотирьох механізмів (відновлювальних властивостей атомів водню H_1^1 при проходженні реакцій рекомбінації, вплив відновлювальних властивостей сумарної концентрації ($\text{CO} + \text{H}_2$), термічного розкладання і впливу ангармонічного акустичного поля) концентрація NO_x знижується у порівнянні з розглянутими режимами до рівня 270 мг/м^3 (тобто у 2 рази в порівнянні з режимом спалювання мазуту і у 1,5 рази у порівнянні з режимом введення водяної пари). Абсолютна кількість NO_2 в NO_x знижується, але співвідношення $\text{NO}_2:\text{NO}$ збільшується до 0,3.

При спалюванні ВПЕ з $W^p = 30\text{ \%}$ (див. рис. 3.17, г) відбувається

переміщення максимуму концентрацій CO , H_2 , $(\text{CO} + \text{H}_2)$ і температури газів на відстань до 200 мм від зрізу пальника (0,2 довжини КЗ). Рівень максимальних концентрацій знаходиться практично на рівні режиму горіння з $W^p = 15\%$, але завершення реакцій горіння і створення NO_x при температурі $\sim 1600^\circ\text{C}$ закінчується на відстані практично в 2 рази більше. Внаслідок впливу чотирьох зазначених механізмів горіння ВПЕ концентрація NO_x знижується до 166 мг/м^3 , тобто в 1,6 рази менше в порівнянні з режимом $W^p = 15\%$. Абсолютна кількість NO_2 в NO_x знижується, а співвідношення $\text{NO}_2:\text{NO}$ збільшується до 0,33, що призводить до зростання абсорбційних властивостей димових газів, збільшення концентрації NO_x в конденсаті H_2SO_4 на конденсаційних поверхнях нагріву з температурами стінки $t_{\text{ст}}$ в межах $130\ldots 70^\circ\text{C}$. Це забезпечує пасивацію поверхні вуглецевої сталі оксидами азоту і як наслідок істотне зниження низькотемпературної кислотної корозії до рівня $\sim 0,15\ldots 0,3 \text{ мм/рік}$.

Зниження концентрації NO_x в порівнянні з режимом $W^p = 15\%$ пояснюється збільшенням тривалості впливу сумарної концентрації $(\text{CO} + \text{H}_2)$ на процеси утворення NO_x (до температури 1600°C) практично в 2 рази. Тривалість процесу термічного розкладання, перепад температур газів, що утворюються в процесі горіння NO_x , практично однаковий з режимом $W^p = 15\%$ (відбувається на ділянці КЗ довжиною 0,2 м тільки зміщеним на $\sim 0,2$ м від зрізу пальника). Так як дисперсність і активність ВПЕ при режимах $W^p = 15$ і 30% забезпечувалися практично однаковими, то вплив рівня енергії звукового поля на створення NO_x слід прийняти значним через більш високий вміст активної води у складі ВПЕ.

Порівняння впливу суми $(\text{CO} + \text{H}_2)$ по довжині КЗ при спалюванні ВПЕ з водовмістом 15 і 30% (при практично однаковій максимальній концентрації на рівні $\sim 1,2 \text{ об.}\%$, але різного кількісного впливу $(\text{CO} + \text{H}_2)$ по довжині КЗ, визначеній по площі під кривими $(\text{CO} + \text{H}_2)$ при $W^p = 15$ і 30% показало, що при водовмісті $W^p = 30\%$ вплив $(\text{CO} + \text{H}_2)$ має бути майже в 1,7 рази більше. Отже, в такій же пропорції повинна знизитися концентрація NO_x .

Згідно з експериментальними даними (див. рис. 4.8, д) концентрація NO_x при $W^p = 30 \%$ становить 166 мг/м^3 , а при 15% – 270 мг/м^3 , тобто при $W^p = 30 \%$ концентрація NO_x в 1,62 рази менше, що може бути пояснено більш високою відновлювальною активністю атомів водню H_1^1 і $(\text{CO} + \text{H}_2)$, більшою ефективністю термічного розкладання оксидів азоту і впливом енергії акустичного поля. Так як максимальні значення температур газів сягають 1950°C при $W^p = 15 \%$ і 1940°C при $W^p = 30 \%$, то тут акустичне поле надає більший вплив на зменшення співвідношення $\tau_{\text{NO}}/[\tau]_{\text{NO}}$, (часу реакції τ_{NO} до часу досягнення рівноважного стану $[\tau_{\text{NO}}]$).

Послідовне порівняння зазначених режимів у порівнянні зі спалюванням мазуту (див. рис. 4.8, а) показує, що при вприскуванні водяної пари до кореня факела (див. рис. 4.8, б) концентрація NO_x знижується в 1,33 рази (NO знижується в 1,48 рази, а NO_2 зростає у 1,27 рази, $\text{NO}_2:\text{NO}$ – у 1,87 рази), при спалюванні ВПЕ з $W^p = 15 \%$ (див. рис. 3.9, в) концентрація NO_x знижується в 1,9 рази (NO – у 2,33 рази, NO_2 зростає у 1,1 рази і $\text{NO}_2:\text{NO}$ зростає у 2,1 рази), при спалюванні ВПЕ з $W^p = 30 \%$ (рис. 3.17, г) концентрація NO_x знижується у 3,2 рази (NO – у 3,7 рази, NO_2 зростає у 1,6 рази і $\text{NO}_2:\text{NO}$ – у 2,3 рази).

Порівняння даних зміни концентрації NO_x і його складових NO і NO_2 по довжині l камери згоряння (див. рис. 4.8, д) показує, що при всіх режимах спалювання (послідовно при вприскуванні водяної пари до кореня факела в кількості на рівні 30 %-ої емульсії, спалювання ВПЕ з $W^p = 15$ і 30 %) спостерігається істотне зниження концентрації NO і NO_x . Важливо відзначити, що співвідношення $\text{NO}_2:\text{NO}$ на виході з КЗ зростає від 0,143 при спалюванні мазуту до 0,33 при спалюванні ВПЕ з $W^p = 30 \%$. Так як це співвідношення близьке до еквімолярного, то відбувається поліпшення абсорбційних властивостей димових газів, що важливо при застосуванні скрубєрних технологій, та їх корозійних властивостей, що сприяє пасивації вуглецевих сталей внаслідок більш ефективної абсорбції оксидів азоту. Це призводить до зниження інтенсивності низькотемпературної кислотної корозії [109].

Відповідно до отриманого апроксимаційного рівняння залежності ($\text{NO}_2:\text{NO}$) від суми ($\text{CO} + \text{H}_2$) (див. рис. 4.8, е) еквімолярне співвідношення $\text{NO}_2:\text{NO}$ може бути отримано при досягненні значення ($\text{CO} + \text{H}_2$) на рівні 1,8 об. %, яке цілком може бути забезпечено при підвищенні інтенсивності кавітаційно-циркуляційної підготовки ВПЕ і створенні умов для попереднього накопичення вільних електронів та іонів під впливом потужного електричного поля при використанні електродіалізного методу підготовки прісної води (ділюату) для ВПЕ, що створить за умов використання в подальшому перспективних плазмових технологій основу для поліпшення інтенсифікації плазмового режиму горіння водопаливних емульсій.

4.3 Вплив пасивації поверхонь нагрівання на інтенсивність низькотемпературної корозії

Отримані експериментальні дані, зафіксовані при дослідженнях поглинання оксидів азоту, підтверджують можливість їхньої участі в процесі утворення H_2SO_4 за нітрозним механізмом додатково до основного контактного. Для цього необхідно проаналізувати концентрацію H_2SO_4 у відкладеннях, що визначає швидкість низькотемпературної корозії. Результати обробки даних інших авторів [92] і проведених автором цього дослідження представлені на рис. 4.9. Як видно з рисунку, отримані концентрації кислоти в конденсаті на поверхні нагрівання при спалюванні водопаливних емульсій (криві 5, 6, 7) зміщені у бік більш високих температур стінки. Зі збільшенням водовмісту W^p у паливі спостерігається збільшення температури стінки t_{ct} , що відповідає 60 %-ій концентрації: при $W^p = 17 \%$, $t_{ct} = 112 \text{ }^\circ\text{C}$, а при $W^p = 30 \%$, $t_{ct} = 116 \text{ }^\circ\text{C}$. Зрушення отриманих залежностей може бути пояснений проходженням реакцій при абсорбції оксидів азоту конденсатом

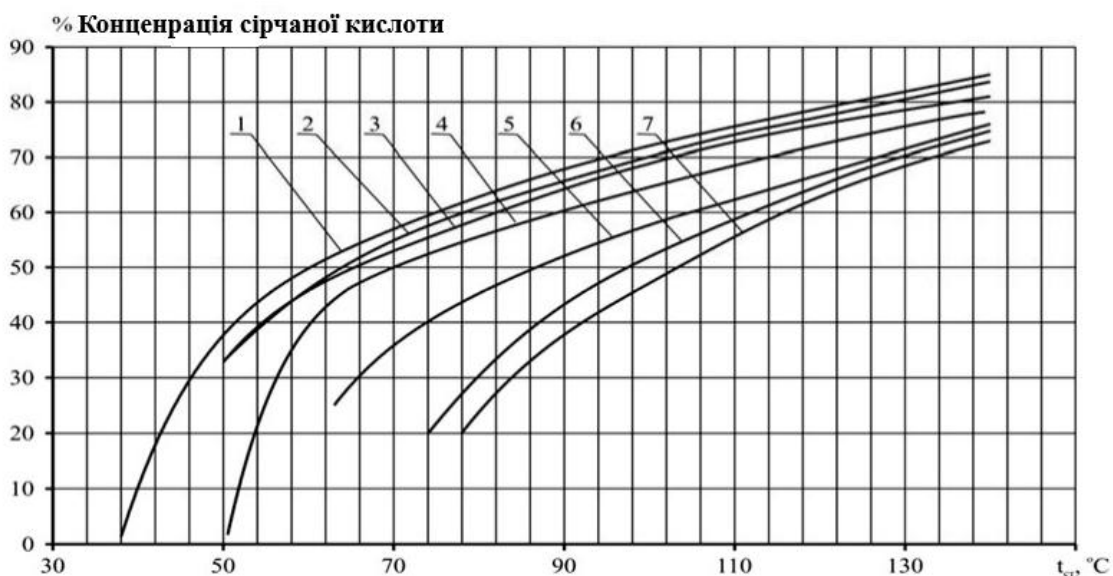


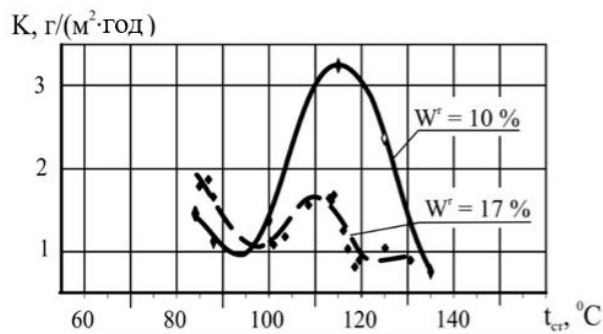
Рисунок 4.9 – Залежність концентрації H_2SO_4 від температури стінки:

- 1 – лабораторні дослідження (при $p = 0,01$ МПа) [43]; 2 – розрахункові значення з урахуванням наявності інертних газів; 3 – експериментальні значення [43]; 4 – експериментальні значення при температурі газів 170°C [2]; 5 – при спалюванні ($\text{M40}+\Phi 12$) ($S^p = 1,5\%$; $W^p = 2\%$), $\alpha = 1,35$; 6 – при спалюванні ВПЕ ($S^p = 1,8\%$; $W^p = 17\%$), $\alpha = 1,35$; 7 – при спалюванні ВПЕ ($S^p = 1,8\%$; $W^p = 30\%$), $\alpha = 1,45$

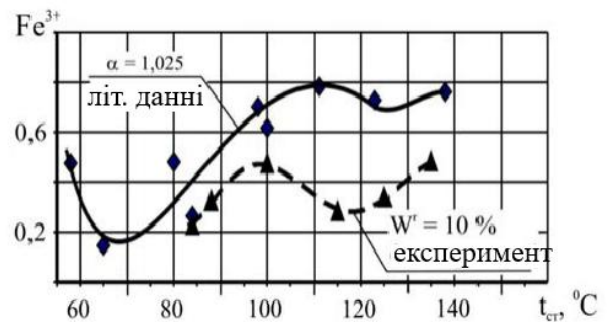
За результатами наших досліджень концентрація сірчаної кислоти при спалюванні «сухого палива» в області «кислотного піка» становить 72% , а при спалюванні ВПЕ – 60% , що відповідає режиму нитрозного механізму.

Наявність оксидів азоту в розчині сірчаної кислоти повинне привести до прояву процесу пасивації поверхні металу. В теорії пасивації важлива роль відводиться як адсорбції O_2 , так і утворенню оксидних шарів які становлять захисний шар, що пасивує. Джерелом O_2 , що бере участь в утворенні пасивуючого шару, може бути HNO_3 . Пасивації можуть сприяти аніони, що дають із металом погано розчинні солі або змішані оксиди. Оксидної пасивації заліза в кислих розчинах може передувати поява на його поверхні сольової плівки. Зокрема, це відноситься до розчинів H_2SO_4 , де утворюються плівки FeSO_4 і $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, тобто при наявності Fe^{3+} у розчині, що знижують критичний струм пасивації.

При спалюванні ВПЕ з $W^p = 10\%$ був визначений вміст Fe^{3+} у змиві відкладень. На рис. 3.19 представлений вміст Fe^{3+} по відношенню до суми $Fe^{3+} + Fe^{2+}$. При зіставленні із кривою $K = f(t_{ct})$ чітко видно, що мінімальному вмісту Fe^{3+} відповідає максимальна швидкість корозії, а максимальному вмісту Fe^{3+} - мінімальне її значення, що підтверджує вплив явища пасивації.



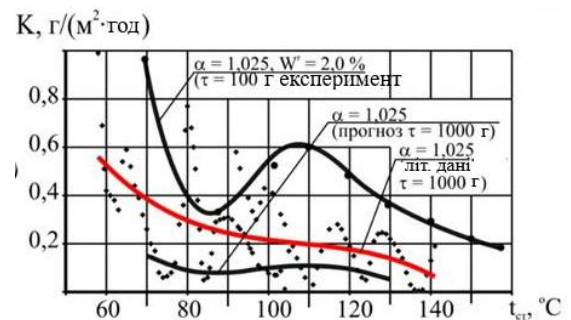
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.10 – Залежність швидкості корозії від температури стінки (а), порівняння відносин $Fe^{3+}/Fe_{заг}$ (б) і HNO_3/H_2SO_4 (в), що характеризують можливість пасивації поверхні металу та порівняння отриманих експериментальних даних з даними (г) при постійних та змінних режимах

Присутність деяких іонів у розчині або гальмує, або прискорює анодний процес. Активуючий вплив на залізо має SO_4^{2-} , так як струм пасивації i збільшується при добавці SO_4^{2-} . Таким чином, SO_4^{2-} бере участь в анодному розчиненні заліза (пасивуючі іони витісняються іонами SO_4^{2-}). При цьому поверхня електрода піддається точковому роз'їданню (питингу). З ростом

концентрації SO_4^{2-} число «виразок» збільшується, а потенціал, при якому електрод активується, стає більш негативним, що й спостерігається при НТК у котлах при спалюванні стандартних палив.

Багато аніонів придушують початок процесу роз'їдання при певнім відношенні концентрацій деякого аніона A^- в розчині. Найбільш ефективний щодо цього аніон NO_3^- . У роботі [110] наведено дані про пасивний стан металу при 50%-ій концентрації H_2SO_4 при введенні в розчин 5 % HNO_3 . Пасивуючий вплив оксидів азоту проявляється до температури 100 °С, тобто до температури стінки, при якій спостерігається «пік» НТК. Добавка NO_3^- стабілізує потенціал і електрод залишається в пасивному стані. Дія NO_3^- проявляється при значному зрушенні потенціалу в позитивну сторону. Ці процеси пояснюють зменшення утворення питингів при спалюванні ВПЕ.

Таким чином, припущення про можливі причини зниження НТК на основі результатів вимірів вмісту NO_3^- , Fe^{3+} підтверджуються представленими відомостями про пасивації поверхні металу. Тому можна зробити висновок, що основним фактором, що спричиняє істотне зниження НТК при спалюванні ВПЕ з вмістом води більше 20 %, є виникнення пасивації металу.

4.4 Підвищення надійності елементів енергетичних установок при спалюванні палива різної якості

Сьогодні значно зростають вимоги до надійності та довговічності енергетичних установок та їх окремих елементів при необхідності одночасного забезпечення високих техніко-економічних та екологічних показників, особливо при експлуатації енергетичного обладнання, що відпрацювало свій нормативний ресурс.

При спалюванні різної якості палива суттєвий вплив на рівень надійності та довговічності роботи енергоустановок має інтенсивність термохімічних

процесів, а саме: забруднення та корозія високотемпературних та низькотемпературних поверхонь нагріву. Тому необхідно оцінити вплив цих флуктуацій на сумарну величину низькотемпературної швидкості корозії (НШК) та на розширення зони корозії та забруднення. На даний момент актуальним є отримання даних про інтенсивність корозії, діапазони впливу змін параметрів роботи енергообладнання, які будуть незамінні при оцінці ефективності вже працюючого обладнання та проектуванні нового.

Для підвищення достовірності отриманих результатів кількісних оцінок інтенсивності забруднення при спалюванні ВПЕ необхідно проводити порівняльні дослідження в однакових або дуже схожих умовах при спалюванні стандартних видів палива.

Усі процеси при горінні ВПЕ відбуваються під впливом ударних звукових хвиль за рахунок мікрОВибухів крапель емульсії. Тому необхідно знати характеристики отриманого звукового поля та способи генерації ударних звукових хвиль.

При кавітаційній обробці води, що використовується для приготування ВПЕ, створюється звукове поле високої інтенсивності за рахунок мікрОВибухів у повному об'ємі камери згоряння. У пристроях акустичного очищення використовуються або пульсуючі пальники, або акустичні випромінювачі розташовані навколо нагрівача. При цьому інтенсивність звуку повинна бути на рівні 130...160 дБ, оскільки для забезпечення необхідної якості очищення необхідно «пронизувати» всю товщу газового потоку.

В енергетичних установках конвективний газохід конструктивно з'єднаний безпосередньо з необхідними поверхнями нагріву, тому потік газів з рівномірно розподіленим звуковим полем безперешкодно досягає поверхонь нагріву. При вирішенні поставлених у дослідженні завдань необхідно враховувати всі фактори, що забезпечують інтенсифікацію конвективного теплообміну шляхом впливу на зовнішній шар з боку газового потоку.

Опубліковані дані [113] про використання пульсуючих пристроїв, які можна вважати подібними до акустичних очисних пристроїв за рахунок пульсуючого впливу звукового тиску достатньої інтенсивності. При цьому необхідно враховувати, що під час роботи пульсуючого пристрою, коли вентиль закритий, потік газів практично припиняється, тоді як у нашому випадку швидкість потоку газу постійна (з накладенням швидкості звукової хвилі). При цьому необхідно враховувати пульсуючу дію на сухі та вологі зернисті (пористі) шари. На сухій поверхні при згорянні ВПЕ можлива повна відсутність відкладень, що потребує пояснення.

Схема руху частинок очисної поверхні під час акустичного очищення показує, що сухі частинки знаходяться в псевдозрідженому шарі з видаленням газового потоку частинок, які віддалилися від поверхні. При наявності конденсату на поверхні картина руху повинна змінитися, тому що частинки, розташовані біля поверхні конденсату, прилипають до шару.

При проктуванні пристроїв з пульсуючим шаром необхідно мати інформацію про вплив пульсації газового потоку на швидкість початку псевдозрідження, яка визначається з умови рівності перепаду тиску, викликаного дією пульсуючого потоку через нерухомий шар зернистого матеріалу гідростатичного тиску. У теорії процесів у киплячому шарі пористість у момент переходу шару у завислий стан приймається рівною 0,4.

Вивчаючи розширення пульсуючого шару [113], було помічено, що для одного максимального розширення угруповання частинок необхідний вплив 2...3 проходів звукової хвилі. Це явище можна пояснити тим, що в пульсуючому шарі змінюється укладання частинок. Якщо в нерухомий шар подати порцію газу зі швидкістю, достатньою для переміщення шару, то шар розширюється на певну висоту h_{\max} . Потім, коли настає мінімум звукового тиску, шар починає падати, тим самим викликаючи стиснення газу на поверхні під шаром. Таким чином тиск під шаром збільшиться, що призведе до його розпушення. Тому осілий шар після першого удару максимального звукового

тиску не досягає початкового значення h_0 , а досягає проміжного $h_{01} > h_0$.

Після другого максимуму звукового тиску (пульсації) частина газу потрапляє в розріджений шар, що зменшує силу потоку газу. Протягом цього періоду шар піднімається при збереженні постійної швидкості фільтрації та частоти пульсації на висоту $h_0 > h_{\max}$. Опускаючись із цієї висоти h_1 після наближення до поверхні мінімального звукового тиску, шар може досягти початкового значення. Насправді поршень не зберігає початкову пористість, а розширюється. При продуванні шару добре сипучих матеріалів переривчастим потоком газу зі швидкістю, достатньою для додання руху шарам, останні розтягуються як пружина. При цьому твердість «пружини» $Z(x)$ не залишається постійною, а зменшується зі збільшенням амплітуди. Таке ж явище може відбуватися в сухому шарі на сухій поверхні при згорянні ВПЕ. Це може призвести до повного очищення сухої поверхні, оскільки в низькочастотному пульсуючому шарі діють лише вимушені сили, де не враховуються вільні коливання.

При дослідженні інтенсивності пульсацій забруднення необхідно враховувати вплив режимів пульсації на розподіл зернистого матеріалу. У пульсуючому шарі, як правило, має місце нестійкий рух газу. Проходження пульсуючого потоку через періодично зважений шар зернистого матеріалу з прямокутною формою пульсацій будемо розглядати як періодично виникають гідравлічні удари.

При роботі установок з пульсуючим шаром на поверхні нагріву налипає дрібнозернистий матеріал. Це призводить до погіршення процесів теплообміну. Тому було цікаво порівняти величину адгезії частинок у разі продування шару стаціонарним потоком і пульсуючим звуковим потоком газу. Експерименти показали [114], що пульсуючому шарі величина зчеплення частинок менша, ніж при обдуві шару стаціонарним потоком. Це пояснюється тим, що в пульсуючому шарі на прилиплі до поверхні частинки діють підвищені ударні сили пульсуючого потоку. В пульсуючому шарі процес теплообміну протікає

значно інтенсивніше, ніж при стаціонарному обдуві. Встановлено, що при стаціонарному продуванні мокрого шару в ньому утворювалися канали і кратери, по яких йшов газ. Газ переносив частинки, які відривалися від каналів і кратерів, хоча шар залишався нерухомим. При цьому можуть виникнути навіть підвищені значення коефіцієнтів теплообміну, що зумовлено інтенсивним омивом поверхні нагріву частинками, що вторгаються з кратерів і каналів. При пульсуючому подаванні газу вологий шар дисперсного матеріалу стає рухомим, оскільки через чергування станів стратифікації не утворюються стійкі канали і кратери. Крім того, імпульсна подача газу в шар вологого матеріалу розпушує його.

Слід зазначити, що в пульсуючому шарі вологого дисперсного матеріалу при високих швидкостях фільтрації відбувається підвищене видалення зернистого матеріалу. У пульсуючому шарі вологого дисперсного матеріалу поверхні нагріву омиваються не окремими частинками, а агрегатами частинок. Схильність вологих частинок до агрегації можна пояснити появою сил поверхневого натягу або автокогезії. У пульсуючому шарі вологого дисперсного матеріалу важливу роль в теплообміні між шаром і поверхнею нагріву відіграє теплопровідність вологого газового середовища, яка вища, ніж у сухого газу. При розрахунку апаратів з пульсуючим шаром вологого дисперсного матеріалу коефіцієнт теплообміну розраховують як для сухого матеріалу з урахуванням поправки на вологість.

Дослідження [113, 114] показали, що коефіцієнт теплообміну між пульсуючим шаром і пучком горизонтальних труб, а також для окремої труби відбувається при менших середніх інтегральних швидкостях фільтрації, ніж у псевдозрідженому шарі, і на 15-20 % вище.

Слід зазначити, що при зміні частоти пульсацій газового потоку від 0,5 до 70 Гц встановлено, що максимальне значення коефіцієнта теплообміну припадає на частоти пульсацій 1,5-3 Гц, а потім практично не змінюється до підвищення частоти до 70 Гц, хоча залишається вищим, ніж у киплячому шарі.

Максимальне значення коефіцієнта теплообміну виникало в резонансному режимі, коли частота вимушених пульсацій збігалася з частотою пульсацій шаруватого зернистого матеріалу. Таким чином, пульсуючий режим руху газового потоку сприяє очищенню поверхонь нагріву як сухих, так і мокрих поверхонь ТЕНів електростанцій.

При спалюванні сірчаного палива з S^p вище 1 % при температурі стінки $t_{ст}$ нижче краплі роси утворюються пари кислоти. Як наслідок, низькотемпературна сірчиста корозія обмежує глибину утилізації тепла відпрацьованих газів за рахунок високої швидкості корозії на виході з поверхонь нагріву. Це не дозволяє забезпечити високий ККД енергоустановок.

Для оцінки спільного впливу 3 факторів (α , S^p , W^p) від швидкості забруднення у вигляді ΔG_3 , визначити значення констант і вагових коефіцієнтів у рівнянні багатовимірної регресії, визначити фактори істотного впливу на ΔG_3 , використовувалася система Statgraphics Plus (рис. 4.11).

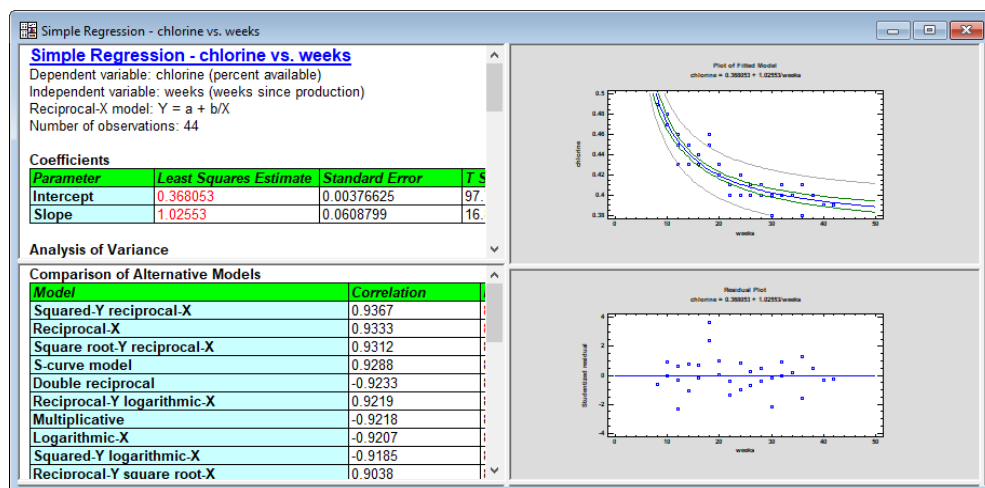


Рисунок 4.11 – Розрахунок залежностей за допомогою системи Statgraphics

Отримані дані для розрахунку швидкості корозії для умов, коли $t_{ст}$ знаходиться нижче точки роси і значеннях α до 1,5, дали змогу отримати залежність $\Delta G_3 = f(\alpha)$.

При спалюванні сірчаного мазуту М40 з $S^p = 1,5$ % і $W^p = 2,0$ % і ВПЕ при

$W^p = 30\%$ були отримані значення ΔG_3 при збільшенні α до 1,5, які співпадають з результатами інших авторів [114].

На основі отриманих залежностей $\Delta G_3 = f(\alpha)$ отримано формули для розрахунку питомого приросту забруднюючих речовин ΔG_3 при різному вмісті сірки та води.

Формули мають такий вигляд:

а) при спалюванні легких видів палива:

$$\begin{aligned} 1 - W^r = 2\%, \Delta G_3 &= 62,249 \cdot \ln(S) + 20,143; \\ 2 - W^r = 17\%, \Delta G_3 &= 47,572 \cdot \ln(S) + 17,904; \\ 3 - W^r = 30\%, \Delta G_3 &= 22,693 \cdot \ln(S) + 10,306; \end{aligned}$$

б) при спалюванні мазуту:

$$\begin{aligned} 1' - W^r = 2\%, \Delta G_3 &= 211,209 \cdot \ln(S) + 65,827; \\ 2' - W^r = 17\%, \Delta G_3 &= 172,903 \cdot \ln(S) + 60,586; \\ 3' - W^r = 30\%, \Delta G_3 &= 132,617 \cdot \ln(S) + 36,652. \end{aligned}$$

Шляхом статистичної обробки даних були отримана залежність, що враховує вплив надлишку повітря, вмісту води та сірки на значення ΔG_3 у ВПЕ:

$$\begin{aligned} \Delta G_3 = & -173 + 3W^r + 0,99\alpha + 245S^r - \\ & - 0,03(W^r)^2 - 0,25W^r\alpha - 2,1W^rS^r - \\ & - 0,8\alpha^2 + 16,9\alpha S^r - 42,6(S^r)^2 \end{aligned}$$

Підсумовуючи отримані результати, можна стверджувати, що на значення ΔG_3 в першу чергу впливає вміст сірки S^p і води W^p у ВПЕ, а потім надлишок повітря α .

Висновки до розділу 4

1. Розроблено конструктивні схеми промислових (опалювальних) і утилізаційних котлів з установкою конденсаційних поверхонь нагріву,

виготовлених з вуглецевої сталі, при температурі стінки $t_{ст}$ до 70 °С, що забезпечує конденсацію пари сірчаної кислоти, а при $t_{ст}$ нижче 70 °С – конденсаційних поверхонь із нержавіючої сталі з конденсацією пари H_2SO_4 і H_2O . Запропоновано також використання скрубберної технології, де замість конденсаційної поверхні встановлюється насадка з некорозійного матеріалу. Застосування скрубберних технологій дозволить забезпечити майже 100 % утилізацію теплоти конденсації пари сірчаної кислоти і води при одночасній надійній роботі конденсаційних поверхонь і газоходів, що дозволить підвищити ККД до 99 % і вище.

2. Застосування електродіалізних опріснювачів в суднових котельних установках для одержання необхідної кількості води забезпечує комплексне використання водних ресурсів: ділюату із властивостями дистилату для підготовки водомазутної емульсії та створення запасу прісної води, а католіта з лужними властивостями – для зрошення насадки скрубера з метою забезпечення інтенсифікації абсорбційних процесів. Отримані залежності відносної вартості знесолоної води від продуктивності системи водопідготовки котла.

3. При використанні скрубберних технологій для зниження рівня викидів токсичних речовин та температури газів, що йдуть до 30-40 °С, замість поверхні з нержавіючої сталі можлива установка теплообмінника на виході з мокрого скрубера при доведенні зрошуваного розчину католіту до рівня рН 6,5...7,0, що дозволяє підвищити ККД котла більше 100 % (при розрахунку за нижчою теплотою згоряння).

4. Розроблена схема технології процесу комплексного використання паливно-енергетичних і водних ресурсів, відмінною рисою якої є застосування кавітаційної обробки різного рівня інтенсивності на всіх етапах попередньої підготовки прісної води, палива (або нафтомасловмісних вод) перед змішуванням у кавітаторі. Дана технологія не вимагає істотної реконструкції паливної системи ДВЗ або котлів з урахуванням використання в сучасних

системах підготовки палива гомогенізаторів. Підвищення абсорбційних властивостей газів, що йдуть, і католита, що направляється на зрошення скрубєрів, дозволяє зменшити розміри секцій скрубєра для абсорбції NO_x у 3-4 рази, абсорбції SO_2 – у 5-8 разів, CO_2 – у 1,4 рази із забезпеченням сучасних вимог до рівня викидів токсичних речовин.

5. Проведений агналіз впливу впорскування водяної пари і спалювання мазуту та ВПЕ з різним вологовмістом на емісію шкідливих речовин. При аналізі ефективності заходів щодо зниження емісії NO_x необхідне визначення не тільки загальної кількості NO_x , але й вмісту в них NO і NO_2 , що визначає величину загальної токсичності димових газів і розчинність оксидів азоту в конденсаті. Встановлено, що при спалюванні мазуту спостерігалися найменші концентрації H_2 і CO та максимальне значення NO_x на рівні 532 мг/м³. Впорскування водяної пари знижує концентрацію NO_x у 1,33 рази у порівнянні зі спалюванням мазуту. При спалюванні ВПЕ з $W^p = 15\%$ концентрація NO_x знижується у порівнянні з розглянутими режимами до рівня 270 мг/м³. Абсолютна кількість NO_2 в NO_x знижується, але співвідношення $\text{NO}_2:\text{NO}$ збільшується до 0,3. Для спалювання ВПЕ з $W^p = 30\%$ концентрація NO_x знижується до 166 мг/м³. Тут відбувається поліпшення абсорбційних властивостей димових газів, що сприяє пасивації вуглецевих сталей внаслідок більш ефективної абсорбції оксидів азоту, наслідком чого є зниження інтенсивності низькотемпературної кислотної корозії.

6. Для оцінки впливу спільної дії трьох факторів – коефіцієнту надлишку повітря, вмісту сірки та води, з використанням методів статистичної обробки даних отримано рівняння багатовимірної регресії, що дає змогу визначити швидкість приросту забруднюючих речовин на поверхнях нагріву при спалюванні ВПЕ з вмістом води до 30 %.

7. Результати досліджень процесів спалювання ВПЕ можуть бути використані при модернізації котельного обладнання як теплових станцій, промислових, опалювальних котелень, так і суднових котельних установок. Це

дасть змогу зменшити витрати первинного рідкого палива, підвищити ефективність та надійність роботи енергоустановок, їх екологічні показники з урахуванням сучасних вимог до рівня шкідливих викидів.

ВИСНОВКИ

1. Визначено основні напрямки дослідження організації процесів горіння в низькоемісійних камерах згоряння та фактори, що впливають на процес згоряння водопаливної емульсії та утворення шкідливих речовин. Зазначено, що крім фізичних факторів, які характеризують процеси упорскування та сумішоутворення емульсії, існують і хімічні, викликані різким збільшенням кількості води та змішуванням водяної пари з парою палива, що впливає на процес горіння водопаливних емульсій.

2. Зазначено, що в останній час надається перевага спалюванню попередньо переміщеної паливо-повітряної суміші, що забезпечує низьку емісію оксидів азоту. Стійкість процесу забезпечується упорскуванням водяної пари на стадіях подачі та горіння, кількість якої залежить від амплітуди акустичних коливань і частки палива в суміші.

3. Показано переваги застосування водопаливних емульсій у порівнянні з безпосереднім введенням води або водяної пари у зону горіння, що збільшує швидкість і повноту згоряння суміші. Для забезпечення якості процесу горіння ВПЕ необхідно застосовувати додаткові заходи з активації робочого процесу. Попереднє змішування та випар водопаливної емульсії дозволить здійснювати своєчасне запалення паливо-повітряної суміші та стабілізацію фронту полум'я для всіх режимів експлуатації енергетичних установок.

4. Проаналізовано механізми виникнення різних видів нестійкості горіння, відмічено, що найбільш небезпечною є високочастотна нестійкість, для подолання наслідків дії якої необхідно вживати додаткові заходи. Показано, що при певних обставинах вона може інтенсифікувати процеси тепломасообміну, покращувати агрегацію часток і коагуляцію аерозолів, забезпечити збільшення теплонапруженості топкового об'єму і зменшення кількості шкідливих речовин в димових газах.

5. Проведений аналіз показав, що процес горіння крапель ВПЕ

супроводжується явищем мікровибуху при їх нагріванні, параметри якого визначаються об'ємним вмістом води в паливі та дисперсністю емульсії.

6. Проаналізовано процес виникнення високо- та низькотемпературної корозії, визначено особливості її протікання та основні фактори, що впливають на її інтенсивність. Визначено, що максимальна швидкість корозії спостерігається при вологості 15-25 %.

7. Проведені експериментальні дослідження для вуглецевої сталі 20 та нержавіючої сталі 1X18H10T щодо впливу мінеральної частини палива та води при спалюванні ВПЕ, температури поверхні металі та коефіцієнту надлишку повітря при різному солемісті води у складі емульсії. Це дозволило отримати залежності витрати водомазутної емульсії при водовмісті 2-30 % і чистого палива. Встановлено, що при спалюванні ВПЕ у котлах з водовмістом 25...27 % економія чистого палива складає 25 %. Найбільший рівень економії палива спостерігається при максимальному рівні активності кавітаційної підготовки емульсій.

Отримано залежності для прогнозування інтенсивності швидкості високотемпературної та низькотемпературної корозії сталей 20 та 1X18H10T при різному солемісті та коефіцієнті надлишку повітря. Дослідження показали, що зі зменшенням солемісту водомазутної емульсії швидкість високотемпературної корозії знижується, а підвищення солемісту незначно впливає на швидкість НТК внаслідок пасивації оксидами азоту поверхні вуглецевої сталі. Завдяки отриманим даним можна визначити найнижчу допустиму температуру поверхні нагріву при спалюванні водопаливних емульсій з вмістом води до 30 %, враховуючи кількість солей у паливі. Це дозволяє оцінити можливість використання конденсаційних поверхонь нагріву з урахуванням припустимої швидкості корозії.

8. З урахуванням низької швидкості низькотемпературної корозії розроблено конструктивні рішення для промислових та опалювальних котлів за умов спалювання ВПЕ з водовмістом 30 % та солемістом до 490 мг/дм³. Це варіанти з сухим економайзером, сухим економайзером та конденсаційною

поверхнею нагріву для конденсації пари сірчаної кислоти, з сухим економайзером і конденсаційною поверхнею для конденсації пари H_2SO_4 і H_2O , з сухим економайзером і конденсаційною поверхнею для конденсації пари H_2SO_4 та скруббером для конденсації водяної пари. Показано, що застосування скрубберних технологій дозволить забезпечити майже 100 % утилізацію теплоти конденсації пари сірчаної кислоти і водяної пари при надійній роботі конденсаційних поверхонь котлів.

9. Розроблена технологія комплексного використання паливно-енергетичних і водних ресурсів з електродіалізною обробкою води, особливістю якої є наявність кавітаційної обробки різного рівня інтенсивності на всіх етапах попередньої підготовки води, палива або нафтомасловмісних вод перед змішуванням у кавітаторі. Підвищення абсорбційних властивостей димових газів і католіта, який йде на зрошення скрубберів, дозволяє зменшити розміри секцій скрубера для абсорбції NO_x у 3-4 рази, SO_2 – у 5-8 разів, CO_2 – у 1,4 рази із збереженням низького рівня викидів токсичних речовин.

10. Для визначення інтенсивності емісії шкідливих речовин проведений аналіз впливу впорскування водяної пари при спалюванні мазуту та ВПЕ з різним вологовмістом. Показано, що величина загальної токсичності димових газів і розчинність оксидів азоту в конденсаті визначається не тільки загальною кількістю NO_x , але й вмістом в них безпосередньо NO і NO_2 . Встановлено, що найменші концентрації H_2 і CO спостерігалися при спалюванні мазуту, наслідком чого є максимальне значення NO_x – 532 мг/м³. Впорскування водяної пари знижує концентрацію NO_x у порівнянні зі спалюванням мазуту в 1,33 рази. При спалюванні ВПЕ з $W^p = 15$ % концентрація NO_x знижується рівня 270 мг/м³. При спалюванні ВПЕ з $W^p = 30$ % концентрація NO_x знижується до 166 мг/м³, відбувається поліпшення абсорбційних властивостей димових газів, що сприяє пасивації вуглецевих сталей внаслідок більш ефективної абсорбції оксидів азоту, наслідком чого є зниження інтенсивності низькотемпературної кислотної корозії.

11. Для оцінки комплексного впливу ряду факторів – коефіцієнту

надлишку повітря, вмісту сірки та води – за допомогою статистичної обробки експериментальних даних отримано рівняння багатовимірної регресії, яке дозволяє визначити швидкість приросту забруднюючих речовин при спалюванні ВПЕ з вмістом води до 30 %.

12. Результати проведених досліджень можуть бути використані при модернізації котельного обладнання теплових станцій, промислових, опалювальних котелень, так і судових котельних установок. Це дасть змогу зменшити витрати первинного рідкого палива, підвищити ефективність та надійність роботи енергоустановок, їх екологічні показники з урахуванням сучасних вимог до рівня шкідливих викидів.

13. Результати виконаного дослідження впроваджені у філії ХЦКБ «Енергопрогрес»ТОВ «Котлотурбопром» (м. Харків) та використовуються на кафедрі теплотехніки та енергефективних технологій НТУ «ХП» у освітній програмі для здобувачів другого (магістерського) рівня.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сучасний стан теоретичних досліджень високочастотної стійкості робочих процесів в камері згоряння рідинних ракетних двигунів / О.В. Пилипенко та ін. *Технічна механіка*. 2020. № 2. С. 5-21.
2. Zhiguo Zhanga, Dan Zhaob, Nuomin Hanb, Shuhui Wangc. Control of combustion instability with a tunable Helmholtz resonator. *Aerospace Science and Technology*. 2015. № 41. P. 55-62.
3. Исследование вибрационных характеристик судового газотурбинного двигателя с гибридной камерой сгорания / С.И. Сербин и др. *Вестник НУК имени адмирала Макарова*. Николаев : НУК, 2004. № 1. С.56-62.
4. Сербин С.И., Мостипаненко А.Б., Гончарова Н.А. Низкоэмисионные камеры сгорания ГТД : монография. Миколаїв : Видавець Торубара В.В., 2016. 224 с.
5. Fahd M., Wenming Y., Lee P. Experimental investigation of the performance and emission characteristics of direct injection diesel engine by water emulsion diesel under varying engine load condition. *Applied Energy*. 2013. № 102. С. 1042-1049.
6. Armas O., Ballesteros R., Martos F.J., Agudelo J.R. Characterization of light duty Diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel. *Fuel*. 2005. № 84. С. 1011-1018.
7. Особливості процесу згоряння в дизелі при роботі на водопаливній емульсії / А.П. Марченко та ін. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2016. № 1. С. 3-10.
8. Калінков О.Ю., Тищенко В.Н., Берегова О.М. Фізична та колоїдна хімія: навчальний посібник. К. : Центр учбової літератури, 2008. 496 с.
9. Михайленко Г.Г., Миронов Д.В. Дисперсні системи і поверхневі

явища. Колоїдна хімія. Одеса : Екологія, 2005. 168 с.

10. Thomson R.V., Thorp J., Armstrong G., Katsoulakos P. The burning of emulsified fuels in diesel engines. *Trans. Inst. Mar. Eng.* 1981. V. 93. pp. 19-25.

11. McAllister Sara, Chen Jyh-Yuan, Carlos Fernandez-Pello A. *Fundamentals of Combustion Processes*. Springer, 2011th edition. 328 p.

12. Greeves G., Khan Ii. M., Onion G. Effects of water introduction on diesel engine combustion and emission. *Power systems*. 1977. № 1. С. 321-336.

13. Дудецький, О.О., Драч О.В. Використання емульсії з палива та води для підвищення ефективності ДВЗ. Науково-методична конференція викладачів, співробітників і студентів : тези доповідей, Конотоп, 29 березня 2012 р. Суми : СумДУ, 2012. Ч.2. – С. 49-50.

14. Марченко А.П., Парсаданов І.В., Савченко А.В. Визначення комплексного паливно-екологічного критерія для дизеля при роботі на водопаливній емульсії. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2021. № 2. С. 31-37.

15. Ghojel J., Honnery D., Al-Khaleefi K. Performance, emissions and heat release characteristics of direct injection diesel engine operating on diesel oil emulsion. *Applied Thermal Engineering*. 2006. № 26. P. 2132-2141.

16. Atkins P. W., De Paula J. *Physical chemistry*. 9th ed. NY : W.H. Freeman and Company, 2010. 1139 p.

17. Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И. Теплофизические процессы в эмульсиях (получение, использование, утилизация). Київ : Наукова думка, 2005. 264 с.

18. Корниенко В.С., Радченко Р.Н., Щербак Ю.Г. Сокращение выбросов двигателя внутреннего сгорания при сжигании водотопливных эмульсий с использованием эффекта «микровзрывов». *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2019. №7 (159). С. 87-91.

19. Diederichsen J. and Wolfhard H.G. The burning velocity of methane

flames at high pressure. *Trans. Faraday Soc.* 1956, 52. P.1102-1109.

20. Wettstein R. The Wärtsilä low-speed, low-pressure dualfuel engine, AJOUR Conference, 2014. Odense, 27/28 Nov. – 31 p.

21. Применение водотопливной эмульсии в автотракторном дизеле. Энергетические и экономические показатели. (Часть 2) / И.В. Парсаданов, и др. *Двигатели внутреннего сгорания*. Харьков, 2011. № 2. С. 121-123.

22. Kravchenko O., Suvorova I., Baranov I., Goman V. Hydrocavitation activation in the technologies of production and combustion of composite fuels *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 4/5 (88). P. 33-42.

23. Опятюк В.В. Особливості випаровування та горіння краплин водопаливних емульсій важких вуглеводнів : автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук : 01.04.17. Одеса, 2012. 20 с

24. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Medvetskaya N. Combustion of foamed emulsion prepared via bubbling of oxygen-nitrogen gaseous mixture through the oil-in-water emulsion. *Fuel Processing Technology*. 2019. Vol. 186. P. 25-34.

25. Experimental Studies on Combustion and Microexplosion Characteristics of N-Alkane Droplets / Weiwei Shang та ін. *Energy Fuels*. 2020. Vol. 34, 12. P. 16613-16623.

26. Emulsion droplet micro-explosion: Analysis of two experimental approaches / E. Mura та ін. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014. Vol. 56. P. 69-74.

27. K. Law C. H. Lee and N. Srinivasan. Combustion Characteristics of Water-in-Oil Emulsion Droplets. *Combustion and Flame*. 1980. Vol. 37. P. 125-143.

28. M. Matalon and C.K. Law. Gas-Phase Transient Diffusion in Droplet Vaporization and Combustion. *Combustion and Flame*. 1983. Vol. 50. P. 219-229.

29. Gosman A.D. and Ioannides E. Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors. *J. Energy*. 1983. 7(6). P. 482-490.

30. Kalmykov G.P., Larionov A.A., Sidlerov D.A., Yanchilin L.A. Numerical simulation and investigation of working process features in high-duty combustion chambers. *Journal of engineering thermophysics*. 2008. Vol. 17. № 3.

P. 196-217.

31. Young F.R. Cavitation. London : Imperial College Press, 1999. 418 p.
32. Cataldi G. Influence of high fogging systems on gas turbine engine operation and performance. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2006. Vol.128. p.135-144.
33. Дикий М.О., Соломаха А.С., Петренко В.Г. Математична модель випаровування крапель води в повітряному потоці. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. 3/10 (63). С. 17-20.
34. Виникнення автоколивань тиску в потоках теплоносіїв та розроблення механізмів зменшення амплітуди цих коливань / Басок Б.І. та ін. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2022. Вип. 41. С. 6-17.
35. Філіпчук О.М., Колбасенко О.В. Підвищення техніко-економічної ефективності суднових котельних установок при спалюванні водопаливних емульсій. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. Миколаїв : НУК, 2020. № 1 (479). С. 51-60.
36. Горячкін А.В. Підвищення ефективності суднових котлів при спалюванні водопаливних емульсій : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05. Миколаїв, 2007. 20 с.
37. Могила В.И., Ковтанець М.В., Морнева М.О., Ковтанець Т.М. Особливості кінетичного механізму процесу згоряння в тепловозному дизелі при озуванні палива. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2023. № 24. <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/1589>.
38. Андреев А.А., Пирисунько М.А. Перспективи використання озонування в системі рециркуляції відпрацьованих газів ДВЗ. Макаровські читання: Матеріали Всеукраїнського форуму молодих науковців, присвяченого Дню науки. Миколаїв: НУК, 2013. С. 13-14.
39. Петрушина Г.О. Электрохимия: навч. посіб. Дніпро : Пороги, 2018. 84 с.
40. Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. (Теория, расчеты и

конструкции кавитационных аппаратов). Часть 1. Київ: Поліграфкнига, 1997. 840 с.

41. Квартенко О. М. Застосування комбінованих методів у технологіях очищення багатокомпонентних підземних вод. *Технічні науки та технології*. 2020. 4 (18), С. 215-222.

42. Скогарев В.Г., Флорко А.В. Факельное стационарное горение жидкого многокомпонентного углеводородного топлива. *Физика аэродисперсных систем*. Вып. 38. Одеса : Астропринт, 2001. С.82-88.

43. Горбов В.М., Митенкова В.С. Альтернативные топлива в судовой энергетике : монография. Миколаїв : НУК, 2012. 316 с.

44. Сербін С.І., Козловський А.В. Підвищення стійкості низькоемісійної камери згорання газотурбінного двигуна. Збірник наук. праць НУК. Миколаїв : НУК, 2021. № 4 (487). С. 7-13.

45. Звіт з науково-дослідної роботи «Теоретичні основи підвищення стійкості процесів горіння вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згорання газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних стабілізаторів». ДР № 0111U002309. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. Миколаїв: НУК, 2016. 156 с.

46. Calcote H.F., Pease R.N. Behavior of Hydrocarbon Flames in Electrical Field. *Industrial and Engineering Chemistry. Industrie Edition*. 1951. 43, № 12. P. 2726-2731.

47. Основи теорії розвитку і припинення горіння: підручник. Ч.1 / Г.І. Єлагін та ін. Черкаси : ЧПБ, 2005. 188 с.

48. Leighton T.G. The Acoustic bubble. London : Academic Press, 1994. 240 p.

49. Suslick K.S. The chemical effects of ultrasound. *Scientific American*. 1989. February. P. 80-86.

50. Gowrishankar and A. Krishnasamy. Emulsification – A promising approach to improve performance and reduce exhaust emissions of a biodiesel fuelled light-duty diesel engine. *Energy*. Vol. 263. Part C: 125782.

51. Man Yeong Ha, Savash Yavuzkurt. Combustion of a single carbon or char particle in the presence of high-intensity acoustic fields. *Combustion and Flame*. Vol. 86, Issues 1-2, 1991. P. 33-46.
52. Janta-Lipińska S., Shkarovskiy A. and Chrobak Ł. B. Disposal of Wastewater from Fuel Oil-Fired Boiler Plants by Burning Water-Fuel Emulsions. *Energies*. Vol. 15, № 15: 5554.
53. Influence of the Texture Configuration of Heating Surfaces Created by Laser Irradiation on the Ignition and Combustion Characteristics of Liquid Fuels / Orlova E. та ін. *Appl. Sci*. Vol. 13. № 1. P. 95.
54. Lawn C.J. Interaction of the acoustic properties of a combustion chamber with those of premixture supply. *Sound and Vibration*. 1999. Vol. 224. № 5. P. 785-808.
55. Boshoff-Mostert L., Viljeen H.J. Analysis of combustion-driven acoustics. *Chemical Engineering Sciences*. 1998. Vol. 53, № 9. P. 1679-1687.
56. Merk H.J. Analysis of heat-driven oscillations of gas flows. P. 1. *Appl. Sci. Res*. 1956/57. A6. P. 317.
57. Ясиніцький Е.П., Торхов М.І., Лозня С.В., Налісний М.Б. Моделювання механізму автоколивань тиску при вібраційному горінні в низькоемісійних камерах згорання газотурбінних установок. *Вісник Нац. авіаційн. ун-ту*. Київ: НАУ. 2006. № 1. С.105-108.
58. Налісний М.Б. Вібраційне горіння в низькоемісійних камерах згорання газотурбінних установок : Автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.05.16. Харків, 2007. 19 с.
59. Poinso T. Veynante D. Theoretical and Numerical Combustion. Third edition by the authors. Toulouse: CNRS, 2012. 588 p.
59. Bisio G., Rubato G. Sondhauss and Rijke oscillations – thermodynamic analysis, possible applications and analogies. *Energy*. 1999. Vol.24. P.117-131.
60. Tang Y.M., Waldherr G., Jagoda J.I. and Zinn B.T. Heat Release Timing in a Nonpremixed Helmholtz Pulse Combustor. *Combustion and Flame*. 1995. Vol. 100. P.251-261.

61. Павленко А.М., Климов Р.А., Басок Б.И. Кинетика испарения в процессах гомогенизации. *Промышленная теплотехника*. Київ, 2006. Т. 28. № 6. С. 14-20.
62. Павленко А.М., Р.А. Климов. Особенности вскипания капель дисперсной фазы эмульсий при изменении температуры несущей среды. *Металургійна теплотехніка*. 2010. Випуск 2 (17). С.149-156.
63. Ярошевич М.В., Соломаха А.С. Особливості використання водопаливної емульсії для переведення побутових котлів на альтернативні види палива. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34 (73) № 4. С.151-156.
64. Долинский А.А. Басок Б.И., Накорчевский А.И. Адиабатически вскипающие потоки. Київ : Наукова думка, 2001. 208 с.
65. Pariotis E.G., Zannis T.C., Rakopoulos C.D. and Hountalas D.T. Comparative Evaluation of Effects of Adding Water to Intake Air or Diesel Emulsion on Performance and Emissions of an HDDI Diesel Engine. 2020. *Journal of Energy Engineering*. Issue 146, № 5: 04020051.
66. Soulayman S. and El-Khatib R. The Effect of Fuel Emulsion on Fuel Saving in Fire Tube Boilers of Tartous Company for Cement and Construction Materials. *Journal of Solar Energy Research*. Updates 7, 2020.
67. R. Westlye. Experimental Study of Liquid Fuel Spray Combustion. Lyngby: Technical University of Denmark, 2016. 86 p.
68. Shen S., Che Z., Wang T. and Zongyu Y. A model for droplet heating and evaporation of water-in-oil emulsified fuel. *Fuel*. 2020. Vol. 266. P. 34-39.
69. Research of the vibration mode of combustion of water-fuel emulsion for improving the efficiency indicators of the power plant / Kolbasenko O., та ін. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (м. Кременчук, 27-30 вересня 2023 р.). Kremenichuk, Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2023. – P. 1-7.
70. Алімова В.І., Дурягіна З.А. Корозія та захист металів від корозії. Донецьк-Львів: ТОВ «Східний видавничий дім». 2012. 328 с.

71. Хімічна корозія та захист металів / П. І. Стоєв та ін. Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с.
72. Needham A.M., Ounsted D. Investigations into the origins and properties of acid smuts from oil-fired power stations. *J. of the Inst. Fuel.* 1964. Vol. 37. № 278. P.14-19.
73. Теплові й масообмінні процеси та обладнання хімічних і нафтогазопереробних виробництв у системах «газ (пара)-рідина» : підручник / Я.Е. Михайловський та ін.; за заг. ред. Я.Е. Михайловського. Суми : СумДУ, 2021. 391 с.
74. Янко П.І., Мисак Й.С. Режими експлуатації енергетичних котлів. Львів : Українські технології, 2004. 272 с.
75. Тульський Г.Г., Артеменко В.М., Дерібо С.Г. Теоретична електрохімія. Частина 1 : навч. посібник. Харків : Іванченко І. С., 2019. 182 с.
76. Горячкін А.В. Підвищення ефективності суднових котлів при спалюванні водопаливних емульсій; автореф. ... дис. канд. техн. наук. — Миколаїв: НУК, 2007. 24 с.
77. Методи захисту поверхонь нагрівання котлів від корозії під час їхнього простоювання / Мисак Й.С. та ін. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2014. № 795: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. С. 33-39.
78. Allaa M., Soulayman S., Abdelkarim T., Walid Z. Water/Heavy Fuel Oil Emulsion Production, Characterization and Combustion. *Int. Journal of Renewable Energy Development*. 2021. Vol. 10, no 3. P. 597-605.
79. Omi R.T., Yahya W.J., Abd Kadir H. Performance and Emissions of Diesel Engine with Circulation Non-Surfactant Emulsion Fuel System. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2021. Vol. 82, №. 2. P. 96-105.
80. Sugeng D.A., Ithnin A.M., Yahya W.J. Emulsifier-Free Water-in-Biodiesel Emulsion Fuel via Steam Emulsification: Its Physical Properties, Combustion Performance, and Exhaust Emission. *Energies*. 2020. Vol. 13, № 20.

5406.

81. Singh G., Lopes E., Hentges N. Experimental investigation of water emulsion fuel stability. ASME International Mechanical Engineering Conference and Exhibition 2019. Salt Lake City, Utah, USA. – P. 1-6.

82. Jhalani A., Sharma D., Soni Sh. L., Sharma P.K. A comprehensive review on water-emulsified diesel fuel: chemistry, engine performance and exhaust emissions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26, № 5. P. 4570-4587.

83. Hsuan C.-Y., Hou S.-S., Wang Y.-L., Lin T.-H. Water-In-Oil Emulsion as Boiler Fuel for Reduced NO_x Emissions and Improved Energy Saving. *Energie*. 2019. Vol. 12, № 1. pp. 1-8.

84. Nowruzi H., Ghadimi P. Effect of water-in-heavy fuel oil emulsion on the non-reacting spray characteristics under different ambient conditions and injection pressures: A CFD study. *Scientia Iranica*. 2016. Vol. 23, № 6. P. 2626-2640.

85. Soulayman S., El-Khatib R. The Effect of Fuel Emulsion on Fuel Saving in Fire Tube Boilers of Tartous Company for Cement and Construction Materials. *Journal of Solar Energy Research Updates*. 2020. Vol. 7. P. 1-6.

86. Energy Savings and Emission Reduction of Traditional Pollutants, Particulate Matter, and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Using Solvent-Containing Water Emulsified Heavy Fuel Oil in Boilers / Lin S.-L. та ін. *Energy & Fuels*. 2011. Vol. 25, № 4. P. 1537-1546.

87. Сигал А.И. Влияние влаги в дутьевом воздухе на эффективность работы котлов промышленной и коммунальной энергетики. *Теплоэнергетика*. 2004. № 12. С. 34-37.

88. Долинский А.А. Басок Б.И. Дискретно-импульсная трансформация энергии в адиабатно вскипающем потоке. *Промышленная теплотехника*. Киев, 2001. Т. 23. № 4-5. С. 5-20.

89. Gaba A., Enescu D., Nedelcu J., Salisteanu C.I. Reduction of fuel consumption and pollutants emissions in a steam boiler using cerium nitrate additive.

Recent Advances in Energy, Environment and Development. International Conference on Energy&Environment (EE '14). Geneva, Switzerland. 2015. – P. 27-37.

90. Filipshchuk A.N., Kolbasenko O.V., Shevtsov A.P. and Dymo B.V. Technology for Improving Technical, Economic and Ecological Efficiency of Boiler Plants Using Physico-Chemical Correction of the Water-Fuel Emulsions Composition. *Problemele energeticii regionale*. 2021. № 3(51). P. 62-77.

91. Hansen J.P. Exhaust Gas Scrubber Installed Onboard MV Ficaria Seaways] Public Test Report. The Danish Environmental Protection Agency (Environmental Project № 1429. 2012. 30 p.

92. Яворський В. Технологія сірки і сульфатної кислоти. Львів : Національний університет "Львівська політехніка", 2010. 404 с.

93. Tanaka H. Influence of Anions and Cations on the Formation of Iron Oxide Nanoparticles in Aqueous Media. *KONA Powder and Particle Journal*. 2020. P. 1-11.

94. Prediction of flue gas acid dew point temperature distribution range in boilers / С. Бі та ін. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 721. P. 1-10.

95. Stefanoni M., Angst U, Elsener B. The mechanism controlling corrosion of steel in carbonated cementitious materials in wetting and drying exposure. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 113. P. 1-11.

96. Effect of Si Content on the Corrosion Behavior of 420 MPa Weathering Steel / Sun R. та ін. *Metals*. 2019. Vol. 9. № 5. P. 486.

97. The effect of H₂S pressure on the formation of multiple corrosion products on 316L stainless steel surfa / Shah M. та ін. *The Scientific World Journal*. Vol. 2020. Issue 1. P. 1-11.

98. Experimental Study on a Flue Gas Waste Heat Cascade Recovery System under Variable Working Conditions / Liu J. та ін. *Energies*. 2020. Vol.13. № 2. P. 1-19.

99. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: підручник / Запольський А. К. та ін. К. : Лібра, 2000. 552 с.

100. Горбов В.М., Горячкин А.В. Исследование интенсивности коррозионных процессов при сжигании водомазутных эмульсий. *Збірник наукових праць УДМТУ*. Миколаїв: УДМТУ, 2003. № 5 (391). С. 87-95.

101. Колбасенко О.В., Димо Б.В., Горячкін А.В., Корнієнко В.С. Результати досліджень низькотемпературної корозії при спалюванні водопаливних емульсій. *Вісник Приазовського державного технічного університету (Серія : Технічні науки)*. 2018. Вип. 37. С. 44-52.

102. Sugeng D.A., Ithnin A.M., Yahya W.J., Abd Kadir H. Emulsifier-Free Water-in-Biodiesel Emulsion Fuel via Steam Emulsification: Its Physical Properties, Combustion Performance and Exhaust Emission. *Energies*, 2020, vol. 13, № 20. 5406.

103. Горячкін А. В., Колбасенко О. В. Доцільність і переваги використання скрубєрних технологій. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика* : III Всеукр. науково-практ. конф. молодих вчених, фахівців, аспірантів (Маріуполь, 11-12 травня 2017 р.) : тези доп. Маріуполь: ПДТУ, 2017. – С. 104-105.

104. Парсаданов И.В., Теплицкий А.А., Солодовников В.В., Белик С.Ю. Повышение экологической эффективности автотракторного дизеля применением водотопливной эмульсии. XVI-й міжн. конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2011. – С. 64.

105. Influence of anions on the structure and morphology of steel rust particles prepared by aerial oxidation of acidic Fe(II) solutions, *Advanced Powder Technology* / Tanaka H. та ін. 2016. 627 (2016a). P. 2291-2297.

106. Improving the reliability of elements of energy installations when combustion of different quality fuel / Kolbasenko O. та ін. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (м. Кременчук, 27-30

вересня 2023 р.). Kremenchuk, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2023. – P. 1-6.

107. Колбасенко О.В. Вплив способів вводу води в полум'я на ефективність горіння і викиди оксидів азоту. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : «Технічні науки»*. 2020. № 40. С. 150-158.

108. Колбасенко О.В., Димо Б.В., Горячкин А.В., Корниенко В.С. Результаты исследований низкотемпературной коррозии при сжигании водопаливных эмульсий. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2018. № 37. С. 44-52.

109. Пассивация поверхностей нагрева при температурах стенки ниже температуры точки росы паров серной кислоты / Горячкин А.В. та ін. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XII Міжн. науково-технічна конференція : матеріали*. – Миколаїв : НУК, 2021. – С. 234-237.

110. Interface Chemistry / Edited by K. Tamaru. Iwanami Modern Chemistry Series, No 16. Iwanami Skoten, PubL, 1980. 271 p.

111. Димо Б.В., Колбасенко О.В., Горячкін А.В., Язловецький А.В. Підвищення екологічних, техніко-економічних показників та надійності роботи елементів СЕУ при сжигании водопаливных эмульсий. Матеріали Х-ї Міжнародної науково-практичної конференції. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування*. Херсон : ХДМА, 2019. – С. 110-112.

112. Колбасенко О. В., Горячкін А. В., Дем'яненко В. С. Ефективність сжигання водопаливных эмульсий в ДВЗ. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції*. Миколаїв : Видавець Торубара В.В., 2018. – С. 80-82.

113. Chattopadhyaya R., Somnath M. The study of method of acoustic generation of pulses for creating pulsating water jet. *Advances Manuf. Eng. Mater.* 2021. Vol. 2. P. 175-182.

114. Singh G., Lopes E., Hentges N., Ratner A. Experimental Investigation of Water Emulsion Fuel Stability. *ASME International Mechanical Engineering*

Conference and Exhibition 2019, Salt Lake City, Utah, USA. – P. 1-6.

115. Filipshchuk A., Kolbasenko O., Shevtsov A. and B. Dymo. Technology for improving technical, economic and ecological efficiency of boiler plants using physico-chemical correction of the water-fuel emulsions composition. *Problems Regional Energetics*. 2021. Vol. 51. P. 62-77.

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Колбасенко О.В., Димо Б.В., Горячкін А.В., Корнієнко В.С. Результати досліджень низькотемпературної корозії при спалюванні водопаливних емульсій. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : «Технічні науки»*. Маріуполь: ПДТУ, 2018. № 37. С. 44-52.

(Б)

2. Філіпчук О.М., Колбасенко О.В. Теплові і шкідливі викиди димових газів при спалюванні водопаливних емульсій. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. Миколаїв: НУК, 2019. № 3 (477). С. 10-17. (Б)

3. Колбасенко О.В. Вплив способів вводу води в полум'я на ефективність горіння і викиди оксидів азоту. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : «Технічні науки»*. Маріуполь: ПДТУ, 2020. № 40. С. 150-158. (Б)

4. Філіпчук О.М., Колбасенко О.В. Підвищення техніко-економічної ефективності суднових котельних установок при спалюванні водопаливних емульсій. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. Миколаїв: НУК, 2020. № 1 (479). С. 51-60. (Б)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

5. Горячкін В. Ю., Горячкін А. В., Колбасенко О. В. Переваги спалювання кавітаційних водопаливних емульсій. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика : Тези доповідей III Всеукр. науково-практ. конф. молодих вчених, фахівців, аспірантів, м. Маріуполь, 11-12 травня 2017 р. Маріуполь: Приазовський державний технічний університет, 2017. – С. 102-103.*

6. Горячкін А. В., Колбасенко О. В. Доцільність і переваги використання

скрубєрних технологій. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика* : Тези доповідей ІІІ Всеукр. науково-практ. конф. молодих вчених, фахівців, аспірантів, м. Маріуполь, 11–12 травня 2017 р. Маріуполь: Приазовський державний технічний університет, 2017. – С. 104-105.

7. Колбасенко О. В., Горячкін А. В., Дем'яненко В. С. Ефективність спалювання водопаливних емульсій в ДВЗ. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування* : Матеріали V Міжнар. науково-техн. конф. присвяченої 160-річчю з дня народження Рудольфа Дизеля, м. Миколаїв, 21–22 листопада 2018 р. Миколаїв : Видавець Торубара В.В., 2018. – С. 80-82.

8. Димо Б.В., Колбасенко О.В., Горячкін А.В., Язловецький А.В. Підвищення екологічних, техніко-економічних показників та надійності роботи елементів СЕУ при спалюванні водопаливних емульсій. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування* : Матеріали X-ї Міжнар. науково-практ. конф., м. Херсон, 12–13 вересня 2019 р. Херсон : Херсонська державна морська академія, 2019. – С. 110-112.

9. Kolbasenko O., Kundenko M., Vakhonina L., Rudenko A., Mardziavko V. Improving the reliability of elements of energy installations when combustion of different quality fuel. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (м. Кременчук, 27-30 вересня 2023 р.). Kremenchuk, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2023. – P. 1-6 (Scopus).

10. Kolbasenko O., Kundenko M., Sadovoy O., Rudenko A., Mardziavko V. Research of the vibration mode of combustion of water-fuel emulsion for improving the efficiency indicators of the power plant. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (м. Кременчук, 27-30 вересня 2023 р.). Kremenchuk, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2023. – P. 1-7 (Scopus).

11. Колбасенко О.В., Димо Б.В., Анастасенко С.М., Стельмах О.І. Підвищення ефективності спалювання водопаливних емульсій в ДВЗ. *Суднова енергетика: стан та проблеми* : Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф.,

м. Миколаїв, 07-08 листопада 2023 р. Миколаїв : Видавець Торубара В.В., 2023 – С.181-188.

12. Kolbasenko O., Dymo B., Anastasenko S., Stelmakh O. Increasing the efficiency of combustion of water fuel emulsions in internal combustion engines. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування* : Матеріали 15-ої Міжнар. наук.-практ. конф., м. Херсон, 13-15 березня 2024 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2024. – С.42-45.

13. Kolbasenko O., Dymo B. Efficiency of water input into the flame on combustion quality and nitrogen oxide emissions. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : Матеріали XV Міжнар. наук.-техн. конф., м. Миколаїв, 26-27 вересня 2024 р. Миколаїв : НУК, 2024. – С.172-175.

ДОДАТОК Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор філії ХЦКБ «Енергопрогрес»
ТОВ «Котлотурбопром»
Ігор РИЖЕНКО
21.12.2024 р.

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
аспіранта кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій
Національного технічного університету «ХП» КОЛБАСЕНКО Олега
Васильовича «Підвищення техніко-економічної, екологічної
ефективності та надійності роботи котельних установок активацією
горіння водопаливних емульсій»**

Результати дисертаційної роботи Колбасенко Олега Васильовича на тему «Підвищення техніко-економічної, екологічної ефективності та надійності роботи котельних установок активацією горіння водопаливних емульсій» є актуальними та представляють значний інтерес для організацій та підприємств теплоенергетичної галузі.

Виконані у дисертаційній роботі дослідження та запропоновані за їх результатами рекомендації щодо удосконалення технології використання водопаливних емульсій на основі мазутного палива із водовмістом до 30% в котельних установках можуть бути використанні при модернізації котлів різного цільового призначення, що забезпечить економію палива, підвищення екологічних показників та високу надійність експлуатації за рахунок зменшення впливу .

Головний конструктор проекту
філії ХЦКБ «Енергопрогрес»
ТОВ «Котлотурбопром»

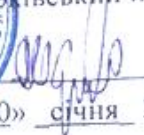


Валерій ПУГАЧОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»

 Андрій МАРЧЕНКО
«10» січня 2025 р.

ДОВІДКА

про впровадження у навчальний процес кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій результатів дисертаційної роботи Колбасенка О.В. «Підвищення техніко-економічної, екологічної ефективності та надійності роботи котельних установок активацією горіння водопаливних емульсій»

В дисертаційній роботі Колбасенка Олега Васильовича розроблені рекомендації щодо використання водопаливних емульсій в енергетичних установках різного цільового призначення з метою підвищення їх техніко-економічних характеристик, зменшення викидів шкідливих речовин в довкілля та підвищення надійності роботи енергетичного обладнання.

Результати досліджень знайшли відображення в удосконаленні навчального процесу для студентів кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій Навчально-наукового інституту енергетики, електроніки та електромеханіки НТУ «ХПІ» та були використані при викладанні курсів «Проектування сучасних котлів та котельних», «Енергетичне обладнання ТЕС і АЕС» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти та при курсовому і дипломному проектуванні.

Зав. кафедри теплотехніки
та енергоефективних технологій
док. тех. наук, професор

 /Микола КУНДЕНКО/



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи НТУ «ХПІ»

проф. Андрій МАРЧЕНКО

» січня 2025 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
аспіранта кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій
Національного технічного університету «ХПІ» КОЛБАСЕНКА Олега
Васильовича на тему «Підвищення техніко-економічної, екологічної
ефективності та надійності роботи котельних установок активацією
горіння водопаливних емульсій» при виконанні держбюджетної
НДР «Теоретичні основи підвищення стійкості процесів горіння
вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних
двигунів використанням плазмохімічних стабілізаторів»
(ДР № 0111U002309)

Комісія в складі: начальник ІДЧ доцент КРИВОБОК Р.В., завідувач кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій професор КУНДЕНКО М.П., професор кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій ГАНЖА А.М. провела аналіз виконання НДР «Теоретичні основи підвищення стійкості процесів горіння вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних стабілізаторів» (ДР № 0111U002309) та визначила, що матеріали дисертаційної роботи КОЛБАСЕНКА Олега Васильовича на тему «Підвищення техніко-економічної, екологічної ефективності та надійності роботи котельних установок активацією горіння водопаливних емульсій» були використані в розділі «Аналіз методів підвищення ефективності та стійкості процесів спалювання водопаливної емульсії у низькоемісійних паливних пристроях», де здобувач провів аналіз існуючих методів спалювання водопаливних емульсій в низькоемісійних камерах згоряння енергетичних установок та визначив фактори впливу на якість процесів горіння та викиди шкідливих речовин.

Голова комісії:

Члени комісії:

Руслан КРИВОБОК

Микола КУНДЕНКО

Антон ГАНЖА