

Кафедра «Енергетичного інжинірингу та робототехнічних систем»

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри

« 8 » 06 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

на тему: Удосконалення показників роботи котельних агрегатів
шляхом інтенсифікації спалювання водопаливних емульсій

Виконала: студентка групи 47-ТЕ-22з

Гаєвська Л.В.
(підпис)

Керівник роботи:

к.т.н., доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Ошовський В.Я.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Первомайський навчально-науковий інститут

Кафедра «Енергетичного інжинірингу і робототехнічних систем»
Спеціальність 144 – «Теплоенергетика»
Освітня програма «Теплоенергетика»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Гарант освітньої програми

(підпис)
«20» 02 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»**

Студентці Гаєвській Л.В.

(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Удосконалення показників роботи котельних агрегатів шляхом інтенсифікації спалювання водопаливних емульсій

Керівник роботи: к.т.н., доцент Ошовський В.Я.

Затверджено розпорядженням ПННІ НУК № 19 від «19» 02 2026 року

Термін подання студентом роботи до розгляду на кафедрі: 01.06.2026

2. Вихідні дані по роботі: Опалювальне навантаження системи теплопостачання та навантаження гарячого водопостачання.

3. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів). Аналіз методів підвищення ефективності та стійкості процесів спалювання водопаливної емульсії у низькоемісійних паливних пристроях. Термоакустичні процеси у камері згоряння при використанні попередньо підготовленої ВПЕ. Дослідження процесів корозії та забруднення поверхонь нагріву при спалюванні водопаливної емульсії. Розробка заходів для підвищення ефективності спалювання водопаливної емульсії в котельних установках.

4. Перелік демонстраційних матеріалів

1. Схема обвязки котла. 2. Границі вібраційного горіння.. 3. Схема зміни вмісту CO, H2, CH2 пол довжині топлення при спалюванні мазуту і впорскуванні пари. 4. Залежність температури у фронті факела. 5. Форкамерний стабілізатор полум'я. 6. Схема двопаливного паливкового пристрою фірми АВВ. 7. Схема роботи високочастотного індукційного плазмотрона. 8. Схема фронтового безфорсункового пристрою. 9. Схема вібраційної камери згоряння. 10. Осцилограма зміни температури горіння великої частинки вугілля при вмиканні / вимкненні акустичних пульсацій.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	к.т.н., доцент Ошовський В.Я.		
2	к.т.н., доцент Ошовський В.Я.		
3	к.т.н., доцент Ошовський В.Я.		
4	к.т.н., доцент Ошовський В.Я.		
5	к.т.н., доцент Ошовський В.Я.		

5. Дата видачі завдання «19» лютого 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Характеристика об'єкта, для якого розробляється проект системи теплопостачання. Мета кваліфікаційної роботи	11.03.2026	Виконано
2	Дослідження системи теплопостачання Центру.	18.03.2026	Виконано
3	Визначення розрахункових теплових навантажень системи теплопостачання	15.04.2026	Виконано
4	Заходи з техніки безпеки при монтажі сонячних водонагрівальних установок	22.04.2026	Виконано
5	Комплексна оцінка екологічного впливу та автоматизації систем	29.04.2026	Виконано
6	Графічна частина	6.05.2026	Виконано

Студентка

(підпис)

Гаєвська Л.В.

Керівник роботи:

к.т.н., доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Ошовський В.Я.

АНОТАЦІЯ

Гаєвська Л.В. виконала кваліфікаційну роботу на здобуття першого (бакалаврського) рівня вищої освіти на тему: *«Удосконалення показників роботи котельних агрегатів шляхом інтенсифікації спалювання водопаливних емульсій»*.

Дослідження присвячене оптимізації технологій використання мазутних водопаливних емульсій у топкових пристроях котлів з метою підвищення їх економічної ефективності, екологічної безпеки та експлуатаційної надійності.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та практична реалізація підходів до оптимізації функціонування котельних агрегатів на основі використання водопаливних емульсій для покращення їх енергетичних, економічних та екологічних характеристик.

У вступі обґрунтовано актуальність застосування ВПЕ як ефективного засобу підвищення коефіцієнта корисної дії котельного обладнання та зниження рівня шкідливих викидів. Визначено наукову новизну, мету та основні завдання дослідження, окреслено існуючі наукові прогалини щодо комплексного впливу параметрів емульсій на процеси горіння, а також наведено відомості про апробацію результатів.

У першому розділі здійснено аналітичний огляд наукових джерел щодо використання водопаливних емульсій у різних енергетичних установках, зокрема в котлах, двигунах та газотурбінних системах. Окрему увагу приділено впливу якості води на ефективність роботи установок та технологіям її підготовки, а також методам активації паливних сумішей, зокрема кавітаційній обробці. Виявлено недостатність систематизованих даних щодо нормативів якості води та особливостей роботи при різній концентрації водної фази. *У другому розділі* досліджено особливості вібраційного (термоакустичного) горіння та його вплив на процеси спалювання ВПЕ. Наведено математичні моделі різних режимів горіння та визначено умови, що забезпечують інтенсифікацію теплообміну і зменшення екологічного навантаження. Розглянуто механізми трансформації водної фази емульсії, що впливають на диспергування паливних крапель.

У третьому розділі проаналізовано процеси високотемпературної та низькотемпературної корозії при спалюванні ВПЕ. Описано експериментальну установку та досліджено вплив складу палива, температурного режиму металу (сталі 20 та 1Х18Н10Т) і коефіцієнта надлишку повітря на інтенсивність корозійних процесів. Встановлено залежності швидкості корозії від мінералізації водної фази та отримано регресійні моделі для її прогнозування.

У четвертому розділі запропоновано інженерні рішення щодо вдосконалення котельних агрегатів, зокрема інтеграцію конденсаційних поверхонь нагріву з корозійностійких матеріалів та застосування скрубєрних технологій. Для суднових енергетичних установок обґрунтовано використання електродіалізної водопідготовки.

У висновках узагальнено основні результати дослідження та підтверджено досягнення поставленої мети й розв'язання визначених завдань.

Ключові слова: котельні установки, водопаливна емульсія, процеси горіння, кавітаційна активація, водовміст, термоакустичні явища, паливна економічність, екологічна безпека, корозія, надійність, ефективність.

ABSTRACT

Hayévska L.V. completed a qualification thesis for obtaining the first (Bachelor's) level of higher education on the topic: *"Improvement of the Performance of Boiler Units through Intensification of Combustion of Water-Fuel Emulsions"*.

The study is devoted to the optimization of technologies for the use of heavy fuel oil water-fuel emulsions in boiler furnaces in order to increase their economic efficiency, environmental safety, and operational reliability. The aim of the work is the theoretical substantiation and practical implementation of approaches to optimizing the operation of boiler units based on the use of water-fuel emulsions to improve their energy, economic, and environmental performance.

The introduction substantiates the relevance of using water-fuel emulsions as an effective means of increasing the efficiency of boiler equipment and reducing harmful emissions. The scientific novelty, purpose, and main objectives of the study are defined, and existing research gaps regarding the complex influence of emulsion parameters on combustion processes are outlined. Information on the approbation of results is also provided.

The first chapter presents an analytical review of scientific sources on the use of water-fuel emulsions in various energy systems, including boilers, engines, and gas turbine units. Particular attention is paid to the influence of water quality on the efficiency of installations and water treatment technologies, as well as methods of fuel mixture activation, in particular cavitation treatment. A lack of systematized data on water quality standards and operational features at different water phase concentrations is identified.

The second chapter examines the features of vibrational (thermoacoustic) combustion and its influence on the combustion processes of water-fuel emulsions. Mathematical models of various combustion regimes are presented, and conditions that ensure heat transfer intensification and reduction of environmental impact are determined. The mechanisms of transformation of the water phase affecting fuel droplet dispersion are considered.

The third chapter analyzes the processes of high-temperature and low-temperature corrosion during the combustion of water-fuel emulsions. The experimental setup is described, and the influence of fuel composition, metal temperature conditions (steel 20 and 1X18H10T), and excess air coefficient on corrosion processes is studied. Dependencies of corrosion rate on the mineralization of the water phase are established, and regression models for its prediction are obtained.

The fourth chapter proposes engineering solutions for improving boiler units, including the integration of condensing heating surfaces made of corrosion-resistant materials and the use of scrubber technologies. For marine power systems, the feasibility of using electrodialysis water treatment is substantiated.

The conclusions summarize the main results of the study and confirm the achievement of the set goal and the solution of the defined tasks.

Keywords: boiler units, water-fuel emulsion, combustion processes, cavitation activation, water content, thermoacoustic phenomena, fuel efficiency, environmental safety, corrosion, reliability, efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ У НИЗЬКОЕМІСІЙНИХ ПАЛИВНИХ ПРИСТРОЯХ.....	13
1.1 Основні напрямки дослідження процесів горіння палива в низькоемісійних камерах згоряння.....	13
1.2 Вплив води на процеси горіння в паливних установках.....	14
1.3 Особливості спалювання водопаливних емульсій.....	19
1.4 Організація процесу дифузійного горіння емульсій.....	26
1.5 Активація передполум'яних процесів та промотування горіння розпиленого рідкого палива.....	28
РОЗДІЛ 2. ТЕРМОАКУСТИЧНІ ПРОЦЕСИ У КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПОПЕРЕДНЬО ПІДГОТОВЛЕНОЇ ВПЕ.....	36
2.1 Процес виникнення коливань при горінні паливних сумішей.....	36
2.2 Основні теоретичні підходи до вивчення термоакустичних коливань.....	38
2.3. Особливості процесу мікрровибуху краплі водопаливної емульсії.....	40
2.4 Дослідження вібраційного режиму горіння водопаливної емульсії для підвищення показників ефективності енергетичної установки.....	43
2.5 Процес горіння окремих частинок вуглецю в акустично пульсуючому потоці.....	46
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОРОЗІЇ ТА ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ.....	53
3.1 Виникнення високо- і низькотемпературної корозії при спалюванні рідких палив.....	53
3.2 Корекція фізико-хімічного складу водопаливних емульсій при	

спалюванні в котельних установках.....	58
3.3 Експериментальні дослідження корозії при спалюванні ВПЕ.....	62
3.4 Дослідження інтенсивності корозії при використанні водопаливної емульсії	68
3.5 Дослідження кінетики корозійних процесів.....	74
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛСІЇ В КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ.....	81
4.1 Конструктивні рішення для підвищення ефективності робіт котлів на мазуті з урахуванням впливу корозії на поверхні нагріву.....	81
4.2 Вплив способів введення води в полум'я на ефективність горіння і викиди оксидів азоту при спалюванні ВПЕ.....	90
4.3 Вплив пасивації поверхонь нагрівання на інтенсивність низькотемпературної корозії.....	95
4.4 Підвищення надійності елементів енергетичних установок при спалюванні палива різної якості.....	98
ВИСНОВКИ.....	104
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЖЕРЕЛ.....	107

ВСТУП

Актуальність теми. Застосування водопаливних емульсій (ВПЕ) в енергетиці є дієвим механізмом часткового заміщення вуглеводневої сировини водою, що мінімізує сукупні витрати палива. В умовах дефіциту енергоносіїв та зростання їх вартості в Україні цей напрям набуває стратегічного значення. Доведено, що використання ВПЕ забезпечує економію мазуту та дизельного палива на рівні 2–8% у двигунах внутрішнього згоряння та до 20% у котельних агрегатах. Крім економічного ефекту, технологія суттєво знижує екологічне навантаження: викиди NO_x скорочуються на 25–45%, SO_2 – на 25...35 %, а сажі — до 80%. Додатковою перевагою є уповільнення корозії та забруднення теплообмінних поверхонь, що особливо критично при утилізації важких залишків нафтопереробки та нафтовмісних вод. Варіативність показників ефективності спалювання водопаливних емульсій (ВПЕ) обумовлена не лише розбіжностями у характеристиках палива та відсутністю регламентів для підготовки води, а насамперед технологічними методами їхнього приготування. Оскільки саме технологія підготовки визначає економічні, екологічні та експлуатаційні параметри роботи паливних агрегатів (ДВЗ, ГТД, котлів), дослідження процесів створення якісних ВПЕ залишається пріоритетним науково-практичним завданням. Визначення адіабатної температури горіння T_a водопаливних емульсій ускладнюється залежністю тепловиділення від рівня обводненості палива. Попри відсутність єдиного підходу до її оцінки, саме цей показник є ключовим для точного розрахунку енергоефективності та теплових характеристик обладнання. Традиційно вважається, що зростання вмісту води у водопаливних емульсіях (ВПЕ) призводить до зниження температури горіння T_a через значні витрати енергії на нагрівання та фазовий перехід води. Проте інтенсифікація тепловиділення та підвищення температури процесу стають можливими завдяки механізму «мікровибухів» крапель і вторинному

розпиленню палива. Крім того, на енергетичні показники впливає хімічний аспект: дисоціація води з подальшим утворенням та згорянням водню, що може спричинити зростання тепловиділення за умови помірної обводненості ВПЕ (у межах 5–10 %).

У сучасних стандартних підходах до теплового розрахунку котлоагрегатів бракує чітких вказівок стосовно визначення теплоти згоряння водопаливних емульсій (ВПЕ). Така ситуація зумовлена обмеженим обсягом практичних досліджень та неоднозначністю наявних дослідних результатів. Окрім цього, на сьогодні немає вичерпної інформації про те, як саме змінюються теплові втрати в котлі під час використання ВПЕ. Зокрема, залишається недостатньо вивченим вплив рівня вологості палива W^p та коефіцієнта надлишку повітря α .

Наразі опубліковано небагато праць, які підтверджують значне сповільнення низькотемпературної сірчанокислотної корозії (НТК) під час використання водопаливних емульсій із вологістю до 30%. Такий ефект дає змогу безпечно зменшувати температуру відхідних газів, що безпосередньо веде до зростання коефіцієнта корисної дії котлоагрегатів. Проте в цих дослідженнях досі не встановлено чіткого взаємозв'язку між швидкістю корозійних α . Це створює прогалину в розумінні того, як оптимізація дуття впливає на довговічність хвостових поверхонь нагріву при роботі на ВПЕ.

Останнім часом наукова спільнота виявляє значний інтерес до електричних теорій кавітації. Оскільки погляди на можливість виникнення мікровибухів безпосередньо у камерах згоряння та їхній реальний вплив на факел залишаються неоднозначними, виникає гостра потреба у поглибленому вивченні механізмів спалювання водопаливних емульсій.

Саме розуміння цих процесів дозволить обґрунтувати методи суттєвої економії органічного палива. Додаткові дослідження допоможуть з'ясувати, як саме мікроскопічні вибухи крапель впливають на якість розпилення та подальшу інтенсивність горіння, що є ключовим фактором енергоефективності. 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.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні та створенні прикладних методів для покращення ефективності котлоагрегатів. Основна увага зосереджена на підвищенні економічних і технічних параметрів, мінімізації шкідливих викидів у довкілля, а також забезпеченні стабільної та безвідмовної роботи обладнання при переході на використання водопаливних емульсій.

Реалізація даної мети пов'язана з вирішенням наступних **завдань**:

- Встановити кількісні показники швидкості високо- та низькотемпературної корозії сталевих елементів залежно від концентрації солей у водній фазі ВПЕ та величини коефіцієнта надлишку повітря.

- Дослідити обсяги скорочення витрат вуглеводневого пального за умови впровадження водопаливних емульсій із різними показниками вологості. Це дозволить оцінити реальну енергетичну ефективність використання ВПЕ залежно від частки води в їхньому складі.

- Здійснити порівняльний аналіз спалювання традиційного мазуту та водопаливних емульсій (ВПЕ) демонструє суттєву різницю в екологічних показниках. Використання ВПЕ дозволяє значно знизити емісію найбільш небезпечних токсикантів завдяки зміні фізико-хімічних процесів у факелі.

Застосування математичного апарату та методів статистичного аналізу дозволить вивести емпіричні залежності для оцінки швидкості корозії елементів нагріву котлів під час експлуатації на водопаливних емульсіях. Це дасть можливість прогнозувати інтенсивність руйнування металу залежно від параметрів паливної суміші. Також необхідно сформулювати комплекс

інженерних порад щодо модернізації та проєктування котлів різного типу. Ці пропозиції мають враховувати специфіку роботи обладнання при спалюванні ВПЕ з підвищеною концентрацією води, забезпечуючи надійність конструкції та стабільність теплових процесів.

Проведене дослідження спрямоване на експериментальне порівняння рівнів викидів токсичних сполук під час спалювання водопаливної емульсії та при прямому впорскуванні води в мазутний факел, що дозволило об'єктивно оцінити екологічну ефективність кожного методу. Водночас було виведено математичні залежності для розрахунку інтенсивності відкладень забруднюючих речовин на робочих поверхнях нагріву при використанні ВПЕ. Отримані рівняння приросту шару забруднень стали основою для прогнозування термічного опору поверхонь та оцінки загальної надійності й безвідмовної роботи котельного обладнання в умовах тривалої експлуатації.

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: проведено комплексні дослідження впливу складу водопаливної емульсії (ВРЕ) — зокрема мінеральних домішок мазуту та вмісту солей у воді — а також температурного режиму поверхні металу та коефіцієнта надлишку повітря на інтенсивність корозії та емісію шкідливих речовин; достовірність отриманих даних підтверджено шляхом верифікації результатів чисельного моделювання та експериментів методом порівняльного аналізу. Застосування методів математичної статистики дозволило вивести апроксимаційні рівняння для прогнозування корозійних процесів. На основі проведеної оцінки адекватності результатів розроблено практичні рекомендації щодо експлуатації мазутних котлів на ВПЕ для підвищення їхньої надійності та ефективності.

Практичне значення результатів дослідження полягає у можливості

впровадження даних щодо специфіки експлуатації котлів на водомазутних емульсіях із різним ступенем обводнення. Отримані висновки можуть бути використані проектними та конструкторськими організаціями під час розробки або модернізації котельного обладнання різного призначення.

При цьому отримані в результаті обробки експериментальних даних математичні залежності дозволяють прогнозувати динаміку високо- та низькотемпературної корозії в довгостроковій перспективі. Це дає можливість оцінювати інтенсивність корозійних процесів при спалюванні водопаливних емульсій різного складу, враховуючи марку сталі поверхонь нагріву, а також рівень вмісту сірки в паливі та солевмісту води, що використовується для приготування емульсії;

Впровадження розроблених конструктивних схем компоновання котельних агрегатів, що передбачають інтеграцію скрубера з функціями підігріву повітря та підсушування газів, забезпечує практично повну (до 100%) утилізацію теплоти конденсації водяної пари та пари сірчаної кислоти. Це гарантує надійну експлуатацію конденсаційних поверхонь і газоходів за температури стінок нижче 70 °С в умовах спалювання водопаливних емульсій.

– Розроблена технологія базується на комплексному управлінні ресурсами шляхом електродіалізної підготовки води. Вона передбачає застосування ділюату для кавітаційного синтезу водопаливних емульсій, а католіту — для зрошення скрубєрів. Це дозволяє ефективно утилізувати теплоту конденсації пари H_2SO_4 і суттєво покращуючи техніко-економічні характеристики та екологічний профіль енергоустановок;

Апробація результатів роботи. Ключові тези та результати проведених досліджень пройшли апробацію на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Молодь, освіта, наука 2026» (Первомайськ, ПННІ НУК 2026).

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

Аналіз джерел [1-4] свідчить, що найбільш перспективною є технологія спалювання збіднених паливно-повітряних сумішей, яка лягла в основу розробок провідних виробників низькоемісійних камер згоряння. Розуміння кінетики запалювання та горіння, а також механізмів формування шкідливих викидів, є критичним для проектування. Це дозволяє ще на етапі розробки розрахувати параметри стійкості полум'я та енерговиділення, а також прогнозувати рівень емісії забруднюючих речовин (NO_x , CO , сажі та аерозолів). Саме тому розробка детальних реакційних механізмів є пріоритетною для створення екологічних енергоустановок та двигунів.

Існує низка наукових напрямів у сфері організації горіння, що потребують глибшого аналізу кінетики ланцюгових реакцій та специфіки формування токсичних 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.

Реалізація цих напрямків передбачає проведення комплексних досліджень, що поєднують квантово-хімічний аналіз елементарних реакцій із розробкою нових кінетичних механізмів. Це необхідно не лише для опису процесів запалення та горіння, а й для прогнозування емісії екологічно небезпечних сполук за допомогою чисельного моделювання та експериментальної верифікації кінетики хімічних перетворень

На основі аналізу експериментальних даних виведено емпіричні залежності, впровадження яких у розрахункові моделі забезпечує високу

точність опису процесів горіння багатокomпонентних палив. Ці результати слугують фундаментом для вдосконалення методології розрахунку кінетичних параметрів термічного окиснення палива

1.2 Вплив води на процеси горіння в паливних установках

У наукових працях [5-7] досліджено механізм впливу водних присадок на спалювання палива в ДВЗ. Зокрема, експерименти із застосуванням важкоокисневої води H_2^{18}O у складі робочої суміші дозволили відстежити шлях ізотопів. Аналіз продуктів згоряння підтвердив активну участь води в хімічних реакціях: до 60 % введеного ізотопу ^{18}O було виявлено у складі вуглекислого газу CO_2 . Особлива увага приділяється хіміко-кінетичним аспектам спалювання обводнених палив. Доведено, що за умов високих температур молекули водяної пари зазнають дисоціації не лише термічно, а й з утворенням водню та гідроксилу $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + 2\text{HO}$. Дослідження Бонгеффера та Рейхардта підтвердили наявність OH -радикалів у парі при температурах 1000...1650 °C. Насичення зони полум'я активними центрами гідроксилу та атомарного водню значно інтенсифікує процеси окиснення вуглеводнів. Зокрема, експерименти Штерна та Поляка підтвердили ключову роль гідроксилу як одного з основних радикалів у ланцюгових реакціях окиснення вищих парафінів.

Каталітичний вплив водяної пари на окиснення оксиду вуглецю зумовлений перебігом реакції $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$. Подальше перетворення водню забезпечує генерацію активних центрів — радикалів OH і атомів H і O , які інтенсифікують процес горіння.

Дослідження засвідчили ідентичний вплив водяної пари та водню в зоні горіння. Зокрема, спостерігається інтенсивне зростання ступеня вигорання вуглецю (C) при підвищенні концентрації H_2O . Це дало підстави стверджувати, що вода виконує подвійну роль: не лише ініціює хімічні

ланцюги, а й безпосередньо забезпечує їхній подальший розвиток.

Дослідження П. Волькера та К. Райта [11] демонструють значний вплив водневмісних сполук на кінетику горіння окису вуглецю. Зокрема, встановлено, що додавання 9,4 % води до суміші CO з повітрям спричиняє зростання швидкості поширення полум'я з 16 м/с до 55 м/с. Проте подальше підвищення концентрації вологи призводить до протилежного ефекту: вода припиняє виконувати роль каталізатора горіння (джерела водню) і починає діяти як інертний розріджувач суміші.

Основним складником продуктів неповного згоряння в дизельних двигунах є сажа. У цьому контексті особливого значення набувають реакції газифікації вуглецю $C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$ та $C + H_2O = CO + H_2$. Вивільнений водень характеризується значно вищою реакційною здатністю порівняно з твердими частками вуглецю, що прискорює його взаємодію з киснем.

Незважаючи на твердження у роботах [12-15] про ключову роль хімічного механізму в покращенні показників дизеля на водопаливних емульсіях (ВПЕ), існують аргументи проти цієї теорії. Зокрема, враховуючи, що при спалюванні 1 кг палива природним шляхом утворюється близько 1,17 кг водяної пари, додаткове введення 10–30% води у складі ВПЕ не має критичного впливу на хімізм реакцій. Крім того, лабораторні дослідження гомогенних сумішей свідчать, що водяна пара радше виступає інертним розріджувачем, який уповільнює швидкість згоряння, що також підтверджується даними щодо спалювання метану [16].

Аналіз наведених результатів підтверджує, що застосування емульгованого палива сприяє інтенсифікації робочих процесів у дизельних двигунах. Зокрема, у дослідженні [17] розглянуто механізм об'ємного сумішоутворення, де ключовою проблемою традиційного палива є його надмірна концентрація в центрі паливного факела. У цій зоні під впливом високих температур відбувається термічний крекінг вуглеводнів, що супроводжується активним сажоутворенням. Через низьку швидкість окиснення вільного вуглецю цикл згоряння затягується, а неповне окиснення

сажі призводить до зростання токсичності викидів та падіння ефективного ККД. Ці деструктивні явища стають особливо критичними під час роботи двигунів на важких фракціях палива або в режимах форсування.

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.

Важливим аспектом є роль водяної пари як каталізатора процесів окиснення та газифікації вуглецю. Попри те, що при спалюванні гомогенних систем [19] власної вологи достатньо для перебігу реакцій, такий підхід не враховує вплив надлишкових активних часток на інтенсифікацію горіння. Особливого значення це набуває у високотемпературних зонах факела з дефіцитом кисню, де домінує термічне розкладання палива. У таких умовах активізація реакцій газифікації вуглецю дозволяє прискорити вигорання в дизелі завдяки швидшому окисненню водню порівняно з сажовими частками.

Згідно з існуючими гіпотезами [20], вплив водопаливних емульсій (ВПЕ) на ефективність горіння пояснюється механізмом внутрішньокрапельного закипання. Експериментальні дослідження крапель розміром 0,3...0,5 мм підтверджують, що інтенсивне нагрівання водяного ядра спричиняє мікровибух паливної краплі. Це забезпечує ефект вторинного розпилення, що сприяє якіснішому змішуванню палива з повітрям та інтенсифікації процесу згоряння.

Поряд із фізичними аспектами розпилення та сумішоутворення водопаливних емульсій (ВПЕ), суттєвий вплив мають хімічні чинники. Вони зумовлені стрімким зростанням концентрації вологи та активною взаємодією водяної пари з пароподібною фазою палива.

Аналіз представлених у [20] даних підтверджує домінування процесів

розпаду вуглеводневих молекул. Завдяки тому, що константа швидкості дисоціації води значно перевищує аналогічні показники для кисню та азоту, виникає висока ймовірність прямої взаємодії гідроксильних радикалів із вуглеводнями. Враховуючи високу концентрацію вуглеводневих радикалів у факелі водопаливної емульсії (ВПЕ) та низьку енергію активації, взаємодія молекул води з активними радикалами стає визначальною. За температур понад 1500 К, коли деструкція вуглеводнів відбувається миттєво, загальна швидкість вигорання палива обмежена лише дифузійним підведенням окислювача.

Інтенсифікація та повнота згорання палива досягаються завдяки попередньому окисненню вуглеводнів водопаливної емульсії (ВПЕ). Це пояснює кореляцію між рівнем вологовмісту в емульсії та концентрацією сажі у продуктах згорання. Оскільки сажові частки формуються внаслідок коагуляції продуктів глибокого крекінгу в умовах кисневого дефіциту, наявність водяної пари та гідроксильних радикалів сприяє окисненню сажових зародків. Це блокує процес їх укрупнення та забезпечує ефективне догорання.

У роботі [21] досліджено механізм хімічної активації горіння паливної суміші під впливом молекул води. Експеримент, проведений на дизельному двигуні 1ЧН18/20 з використанням 40 % водопаливної емульсії (ВПЕ), дозволив встановити ступінь участі кисню води в окисненні вуглеводнів. Застосування методу мас-спектрометрії та ізотопного маркування (ізоотоп ^{18}O) підтвердило, що 60 % кисню, який міститься у складі води в емульсії, бере активну участь у процесах окислення.

Встановлено, що при спалюванні висококонцентрованих емульсій у дизельних двигунах ключову роль відіграє хімічна кінетика взаємодії вуглеводнів із молекулами та продуктами дисоціації води. Це дозволяє стверджувати, що водопаливна емульсія є не просто сумішшю з інертною добавкою, а специфічним видом палива, здатним до якісної та кількісної трансформації процесів горіння в енергетичних установках

У дослідженні [22] обґрунтовано ефективність застосування кумулятивного удару для інтенсифікації розпилення мазуту та водовугільних

суспензій. Автори зазначають, що кумулятивне замикання («схлопування») асиметричних кавітаційних бульбашок забезпечує безпосереднє подрібнення паливної плівки на дрібнодисперсні краплі

Застосування цієї технології зумовило необхідність модернізації відцентрових форсунок шляхом інтеграції спеціально розробленого кавітатора. Завдяки отриманню дрібнодисперсної фракції (10–15 мкм) вдалося скоротити довжину факела та час вигорання палива, забезпечивши при цьому вищий ступінь згорання порівняно зі стандартними аналогами. Використання кавітаторів низького тиску при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,05$ дозволило знизити концентрацію NO до 19 мг/м³ (9,1 ppm). Крім того, на конвективних поверхнях замість твердих відкладень утворився пухкий наліт із підвищенням на 40 % вмістом ванадію, що легко видаляється водою. Режим інтенсивної кавітації забезпечує стабільне горіння емульсії зі сліпучо-білим випромінюванням, що супроводжується дисоціацією вуглеводнів і мінеральних домішок із подальшою рекомбінацією продуктів реакції.

Водомазутні емульсії (ВМЕ) на основі вуглеводнів становлять собою складні багатокомпонентні системи, параметри спалювання яких наразі недостатньо систематизовані. Відомо, що позитивні ефекти емульгування, зокрема паливна економічність та зниження сажоутворення, найповніше реалізуються в умовах розпиленого факела. Саме тому значна частина досліджень зосереджена на аналізі горіння поодиноких крапель та аерозольних струменів. У цих роботах особлива увага приділяється механізмам випаровування, де визначальними факторами є леткість і концентрація компонентів, а також їхні температури кипіння.

Аналіз механізмів випаровування краплі палива в умовах відкритої атмосфери дозволяє виділити дві основні моделі: перша базується на явищі «мікрровибухів» — багаторазового дроблення емульсії через закипання перегрітих внутрішніх водних включень; друга описує процес за відсутності інтенсивної внутрішньої циркуляції, де швидкість фракційного випаровування кожного компонента прямо залежить від його масової частки [23, 25, 26].

Ефективність емульгування прямо залежить від показників

випаровуваності палива: чим вони нижчі, тим вираженішим є позитивний вплив мікровибухів. Це зумовлено тим, що ефект вторинного подрібнення палива реалізується лише за умови виникнення мікровибухів до моменту випаровування або піролізу основної маси крапель [27, 28]. Крім того, при розпиленні емульсій зберігається полідисперсність (неоднорідність) крапель, а кінетика їхнього горіння та час до початку мікровибуху визначаються поточною температурою паливної частинки.

1.3. Особливості спалювання водопаливних емульсій

Еволюція камер згоряння газотурбінних установок (ГТУ) зумовлена необхідністю подолання суперечності між експлуатаційними показниками та екологічною безпекою. Традиційне дифузійне спалювання, попри свою надійність та економічність, призводить до надмірної емісії оксидів азоту (NO_x). Впровадження жорстких екологічних стандартів спричинило перехід до технології спалювання попередньо перемішаної бідної суміші (ППС), що є ефективним методом мінімізації генерації термічних NO_x .

Застосування методів спалювання бідних паливно-повітряних сумішей (ППС) нерідко провокує розвиток вібраційного горіння на певних режимах експлуатації енергоустановок. Дане явище супроводжується значними амплітудами коливань тиску в камері згоряння, що створює ризик механічного руйнування конструкційних елементів. Навіть мінімальні відхилення у складі суміші впливають на стабільність займання та динаміку тепловиділення; у випадку резонансу з акустичними хвилями це призводить до інтенсивних пульсацій тиску. Крім того, стійкість фронту полум'я в камерах згоряння (КЗ) тісно корелює з гідродинамічними процесами та аеродинамічною структурою зон рециркуляції.

У дослідженні [4] наведено результати комплексного аналізу модельної камери згоряння (КЗ). Встановлені кореляції між експериментальними показниками та розрахунковими даними дають змогу прогнозувати рівень

викидів оксидів азоту NO_x і стабільність факела. Математичне моделювання, описане у працях [29, 30], базувалося на врахуванні ключових фізико-хімічних процесів, зокрема турбулентності та кінетики горіння.

На рис. 1.1 наведено залежність меж стійкості від витрат пропану, повітря та пари. Встановлено, що без пари (крива 1) зрив полум'я відбувається раніше, ніж досягаються умови вібраційного горіння, через коливання потоку. Мінімальний поріг стабілізації полум'я за повітрям становить 0,85 г/с. При сталій витраті повітря зони вібраційного горіння зосереджені навколо стехіометричного складу суміші (лінія с-с), де витрата палива визначається співвідношенням $m_p^* = m_p / 15,8$.

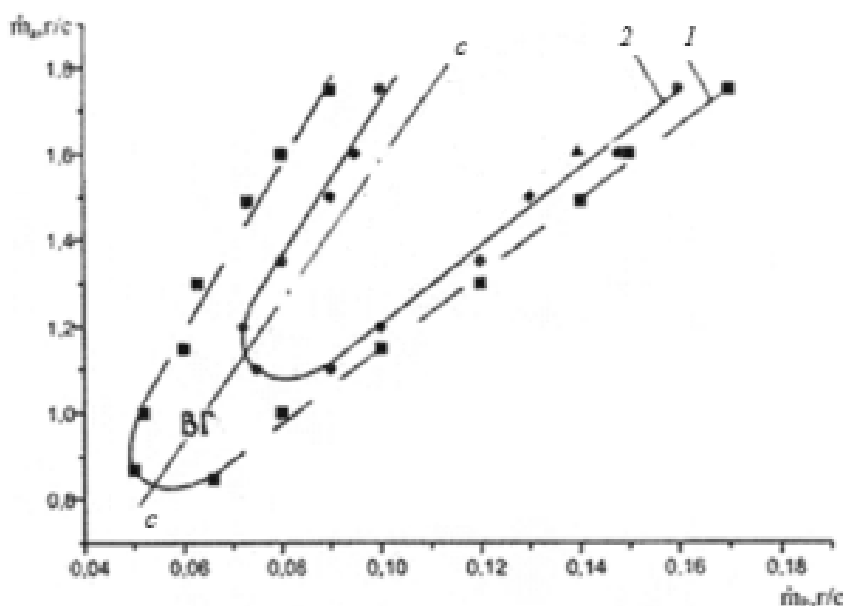


Рисунок 1.1 – Границі вібраційного горіння: 1 – $m_w = 0$; 2 – $m_w = 0,05$ г/с

Введення водяної пари в зону стабілізатора полум'я сприяє звуженню діапазону витрат компонентів палива, за яких виникає неустійливість горіння. Це зумовлює появу чіткої межі вібраційного режиму (рис. 1.1, крива 2), за межами якої акустичні коливання в камері згорання повністю затухають.

Подача водяної пари зумовлює зниження частот коливань при незмінній витраті пропану. Такий ефект пояснюється термічним впливом пари, що призводить до зменшення температури горіння та, відповідно, локальної

швидкості звуку в камері згоряння (КЗ).

Встановлено, що зі зростанням витрати пари максимум частотної залежності зазнає невеликого зміщення в бік стехіометричного складу суміші.

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 у бік надлишку палива.

2. Амплітуда і частота акустичних коливань у камері згоряння 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 згоряння, 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.

Згідно з результатами експериментів, проведених у ХФ НУК, спалювання водопаливних емульсій (ВПЕ) демонструє вищу ефективність процесу горіння порівняно з методом безпосереднього введення води чи

водяної пари в зону факела [35]. Зокрема, у роботі [36] представлено порівняльний аналіз впливу водяної пари та використання водомазутних емульсій (ВМЕ) на показники емісії NO_x , SO_2 та продуктів недожогу. Дослідження виконувалися на базі мазуту М40 ($S^p = 1,8\%$, $W^p = 2\%$) за коефіцієнта надлишку повітря $\alpha = 1,5$. Автор зіставив умови подачі пари в корінь факела із показниками спалювання ВМЕ з вмістом води 15% та 30%.

Згідно з даними, наведеними на рис. 1.2, спалювання обводненого мазуту, на відміну від базового палива, характеризується інакшою динамікою вигорання та зміною концентрації продуктів неповного окиснення в об'ємі топочного простору (як за довжиною, так і за перетином).

Встановлено, що при спалюванні водомазутних емульсій (ВМЕ) з вологістю $W^p = 15$ і 30% концентрація горючих компонентів H_2 , CH_4 і CO на відстані 100–200 мм від зрізу пальника є вдвічі вищою, ніж при введенні аналогічної кількості водяної пари. Попри початкову затримку, до середини довжини факела $W^p = 2\%$, спостерігається майже повне вигорання цих газів. Уповільнення окиснення компонентів при $W^p = 30\%$ зумовлене зниженням температурного фону в камері згоряння порівняно з режимом $W^p = 15\%$.

Показники ефективності енергетичних установок, що працюють на водопаливних емульсіях (ВПЕ), суттєво обумовлені якістю підготовки водної фази. Використання неналежним чином очищеної води спричиняє інтенсифікацію процесів зношування вузлів та механізмів паливної системи.

Використання сірчистих водопаливних емульсій (ВПЕ) супроводжується інтенсивним утворенням водяної пари, що вступає в реакцію з оксидами сірки. Це призводить до конденсації сірчаної та сірчистої кислот на робочих поверхнях, провокуючи активне солевідкладення та корозійні процеси. Присутність води докорінно змінює характер руйнування металу, трансформуючи механізм корозії з чисто хімічного на електрохімічний. Якість води, що використовується для синтезу водопаливних емульсій (ВПЕ), є критичним фактором, що потребує суворого дотримання стандартів. З метою

запобігання деградації обладнання вона має пройти попередню підготовку для повного усунення солей жорсткості та нівелювання корозійної активності. Серед ефективних методів обробки води можна виділити електрохімічну обробку в електролізері та озонування.

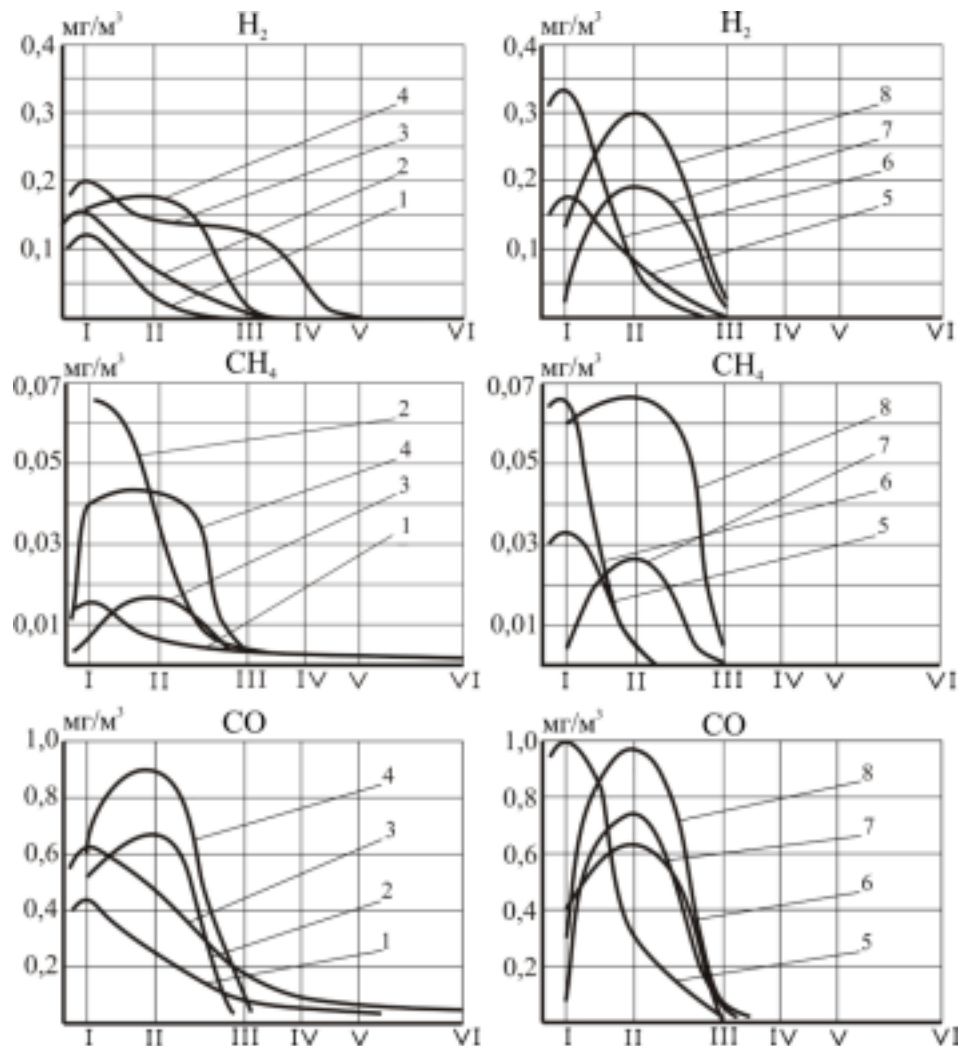


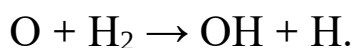
Рисунок 1.2 – Зміна вмісту CO, H₂, CH₄ по довжині топлення при спалюванні мазуту М40 та ВМЕ при впорскуванні пари :

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)

Введення озону безпосередньо в систему подачі палива покращує детонаційний ефект, що пояснюється утворенням атомарного кисню:



Додатковим чинником є екологізація процесу: зростання повноти згоряння дизельного палива (ДП) мінімізує антропогенне навантаження на довкілля. Прискорення високотемпературного самозаймання ДП за наявності атомів Оксигену зумовлене зміною механізму ініціювання ланцюгової реакції. Зокрема, енерговитратний розпад молекул 490 кДж моль заміщується енергетично вигіднішою реакцією з енергією активації $E = 120$ кДж. Формування початкових активних центрів за участю О, а не через деструкцію RH забезпечує розвиток горіння через механізм простих розгалужень, аналогічний процесу займання водню:



Висока початкова концентрація атомарного кисню (О) може спровокувати ланцюгово-тепловий вибух, що характеризується мінімальним періодом індукції.

Додавання озону може здійснюватися до повітряного потоку, палива або води. Проте результати досліджень [37, 38] свідчать про економічну недоцільність озонування повітря, оскільки цей процес потребує підтримання високої концентрації O_3 , що значно підвищує витрати.

Попередній озоноліз дизельного палива зумовлює накопичення в системі живлення значної кількості кисневмісних сполук, а також продуктів конденсації ненасичених та ароматичних вуглеводнів. Це спричиняє потребу в додатковому очищенні палива (шляхом відстоювання чи фільтрації), що призводить до ускладнення конструкції паливної системи та зростання її вартості. При цьому озонування не забезпечує суттєвого продетонаційного ефекту, оскільки основна частка озону витрачається на низькотемпературне окиснення вуглеводнів RH, фактично не потрапляючи до камери згоряння.

Попередній озоноліз води перед її змішуванням із дизельним паливом (ДП) дозволяє усунути зазначені недоліки. Процес розчинення озону у воді підпорядковується закону Генрі. Попри значну варіативність

експериментальних даних ($\alpha = 0,200 \dots 0,286$, $\Delta h = 13 \dots 50$ кДж моль , показники розчинності та ентальпії озону у водних середовищах є суттєво нижчими за аналогічні параметри в органічних розчинниках. Таку різницю можна пояснити перебудовою мікроструктури води під час розчинення в ній неполярних молекул.

Слід зауважити, що зниження рівня рН середовища призводить до закономірного зменшення розчинності озону. Водночас у кислих водних розчинах озон виявляє високу стабільність: зокрема, у 0,2 М HClO_4 при кімнатній температурі добовий розпад озону з концентрацією $1.6 \cdot 10^3$ М не перевищує 5 %. Окрім того, використання озону в жорсткій воді є менш ефективним, оскільки присутність солей (ефект висолювання) знижує ступінь його розчинності. З огляду на вищевикладене, найбільш оптимальним рішенням є подача озону в систему живлення у складі католіту, отриманого в електролізері. Електрохімічна обробка води забезпечує концентрацію іонів у приелектродних зонах, що суттєво трансформує її фізико-хімічні характеристики. У результаті процесу утворюються дві фракції: лужний католіт та кислотний аноліт. Електрохімічна активація підвищує показник рН та ступінь насичення води дисперсними газами O_2 і H_2 . Водночас відбувається дегазація та випадіння в осад солей жорсткості (переважно в католіті), що знижує загальну жорсткість обробленого середовища. Вибір католіту як основи для водопаливних емульсій (ВПЕ) обґрунтований його лужним середовищем, низькою корозійною активністю та відсутністю солей жорсткості. У працях [40, 41] досліджено механізми активації води в умовах кавітаційного режиму, що виникає при турбулентному русі рідини. Авторами встановлено зв'язок між стійкістю метастабільного стану води та обсягом підведеної енергії. Експериментально підтверджено формування гідроксильних радикалів під дією кавітаційного поля, що призводить до подальшого утворення пероксиду водню H_2O_2 , або рекомбінації в молекули води. На основі математичного моделювання запропоновано кінетичну схему

активації та розраховано константи швидкостей відповідних реакцій. Досліди проводилися на динамічному кавітаційному стенді з використанням деаерованого дистиляту та водопровідної води.

Встановлено, що найбільш стабільним є показник рН у деаерованому дистиляті (зміна на 4 %), тоді як у звичайному дистиляті та водопровідній воді відхилення становлять 12 % та 16 % відповідно. Така різниця зумовлена наявністю у водопровідній воді розчинених газів та солей, які здатні вступати у взаємодію з іонами H^+ і тим самим впливаючи на кислотність середовища.

1.4 Організація процесу дифузійного горіння емульсій

У дослідженні [22] проаналізовано метод спалювання рідкого палива, що виключає стадію первинного розпилення. Встановлено, що вміст вологи практично не впливає на температурні показники та геометрію факела, проте сприяє підвищенню прозорості полум'я. Важливим результатом є відсутність коксування в камері випаровування, а також стабільність рівня сажоутворення незалежно від водності палива чи обсягів його споживання. 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. Для досягнення поставленої мети традиційне розпилення палива пропонується замінити процесом емульгування. Передбачається, що отримана водопаливна емульсія (ВПЕ) після попереднього випаровування надходитиме в зону горіння у газоподібному стані. Такий підхід забезпечує формування однорідного ламінарного дифузійного факела, що характеризується повною відсутністю рідкої фази.

Згідно з результатами досліджень, температурні показники газів у фронті мають незначний пік при концентрації води в емульсії на рівні 20–25%.

У межах цих значень температура коливається від 1750 до 1850 К, що графічно відображено у вигляді залежності величини T від C_B 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.

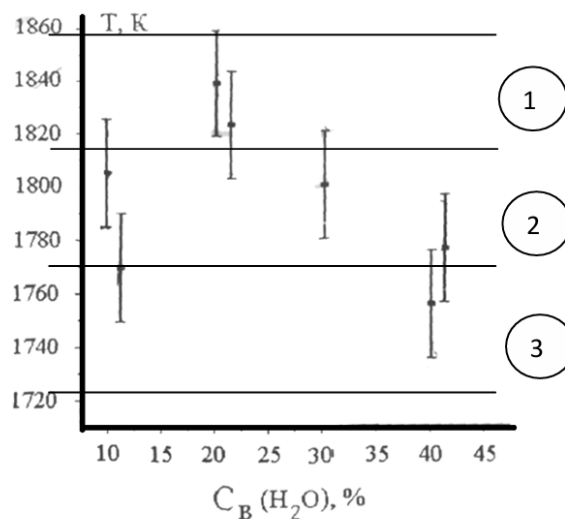


Рисунок 1.3 – Залежність температури у фронті факела T від вмісту води в емульсії C_B

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). Згідно з результатами досліджень, проведених у ХФ НУК, при водовмісті ВПЕ понад 30 % надлишку теплоти стає недостатньо для повного випаровування вологи. Це призводить до зниження температури вихідних газів (зона 3, рис. 1.3). Попри певні розбіжності з даними [43], обидва дослідження підтверджують наявність піку

тепловиділення під час горіння емульсії. Відтак, при розрахунку техніко-економічних показників котлів на ВМЕ важливо враховувати залежність нижчої теплоти згоряння Q^p_n від рівня водовмісту.

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

У праці [25] представлено результати експериментального аналізу передполум'яних явищ під час спалювання крапель вуглемазутної суспензії, до складу якої входили мазут та тонкодисперсний вугільний пил. Дослідження із використанням модельних активаторів (NH_4NO_3 , NaNO_3 , NH_4Cl) засвідчили, що для досягнення максимальної повноти вигорання необхідне додаткове стимулювання робочого процесу. Теоретичне обґрунтування цього активаційного підходу детально викладено у дослідженні [26]. Вода, що міститься в емульсії, виконує функцію активатора горіння. Сукупний вплив модельних активаторів на поверхні вугільних часток і крапель води зумовлює інтенсифікацію горіння та зниження маси твердого залишку. При цьому ключову роль у стимулюванні передполум'яних процесів відіграє належна попередня обробка водомазутної емульсії. Використання рециркуляції продуктів згоряння в паливних пристроях дозволяє збагачувати свіжу суміш активними центрами горіння. Експериментальні дослідження гомогенних вуглеводневих сумішей підтверджують, що введення радикалів за стабільних температурних умов інтенсифікує процес: скорочується період індукції самозапалювання, зростає швидкість поширення полум'я (як ламінарного, так і турбулентного), а також розширюються діапазони стійкості та запалювання суміші [27]. При аналізі впливу рециркуляції димових газів на свіжу паливну суміш ключовим чинником вважається термічний ефект. Проте використання спеціальних конструктивних рішень, спрямованих на підтримання високої концентрації активних центрів реакції (зокрема, шляхом скорочення часу перебування суміші в зоні реакції та мінімізації контакту з поверхнями

рекомбінації), дозволяє додатково активувати ефект хімічного промотування процесу згоряння. Серед перспективних підходів виділяється метод пригнічення нестійкого горіння паливоповітряних сумішей [36]. Автори пропонують введення у камеру згоряння ГТД високотемпературного повітряного струменя, модульованого плазмотроном на резонансній частоті камери. Завдяки використанню фазообертового ланцюжка, струмінь подається у протифазі до коливань тиску, що дозволяє знизити їхню амплітуду до 10 дБ. Крім того, стабілізуючий ефект забезпечує і немодульований струмінь плазмотрона за рахунок подовження зони горіння. Для вирішення проблем із запалюванням у форсажних камерах доцільним є використання форкамерних стабілізаторів полум'я [37]. У таких пристроях (рис. 1.4) підтримується низька швидкість потоку (10...20 м/с), що гарантує стійке горіння та надійне передавання гарячих газів у зони форсажної камери з утрудненим займанням.

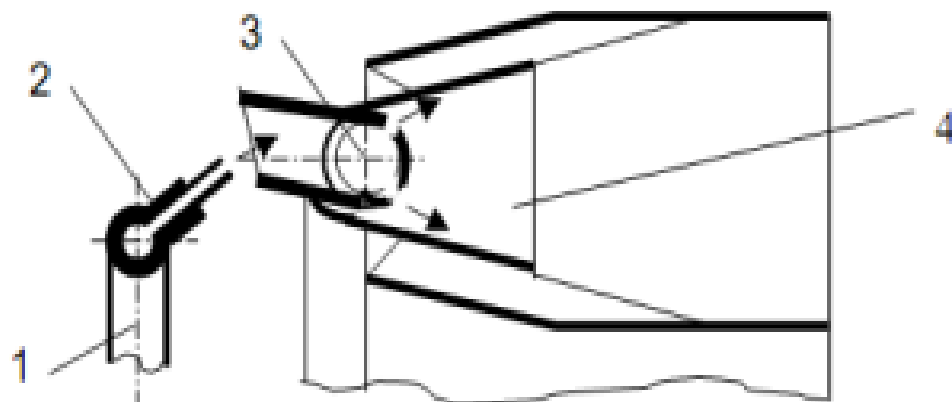


Рисунок 1.4 – Форкамерний стабілізатор полум'я:

1 - паливний колектор; 2 - паливна форсунка; 3 - карбюратор;

4 – форкамера

Завдяки підведенню надлишкової концентрації активних часток, спалювання кавітаційно-активованої водопаливної емульсії (ВПЕ) гарантує надійне займання та стабільне горіння збіднених паливних сумішей безпосередньо у камері згоряння (КЗ). Використання пальника та жарової труби збільшених габаритів у двопаливній камері згоряння компанії Siemens дозволило суттєво розширити діапазон стійкої роботи без зриву полум'я. Це

забезпечило стабільне горіння при частці пілотного палива понад 3% та зниження емісії оксидів азоту до 9 ppm (без зміни коефіцієнта надлишку повітря α). Передбачається, що використання активованої водопаливної емульсії (ВПЕ) як пілотного палива дозволить ще більше розширити ці експлуатаційні межі. Для мінімізації пульсацій у паливному та повітряному трактах низькоемісійної камери згоряння газотурбінного двигуна (ГТД) було застосовано вдосконалену систему демпфування [3] (рис. 1.5). Використання технології попереднього змішування дозволяє отримати гомогенну паливно-повітряну суміш ще до її подачі в зону горіння, що забезпечує стабільний процес окиснення з мінімальним рівнем шкідливих викидів.

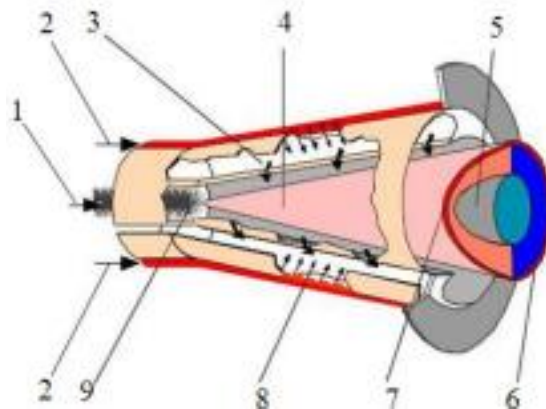


Рисунок 1.5 – Схема двопаливного пальникового пристрою фірми АВВ: 1 – рідке паливо; 2 – газ; 3 – щілинний канал підведення повітря; 4 – випарувач рідкого палива; 5 – зона рециркуляції; 6 – фронт полум'я; 7 – запалення; 8 – отвори підведення газу; 9 – форсунка рідкого палива

Використання активованої водопаливної емульсії (ВПЕ) у двопаливних пальниках EV (розробки компанії АВВ) у камерах згоряння ГТД типу GT-10 забезпечило високу якість запалювання паливоповітряної суміші. Це також дозволило досягти стабільного фронту полум'я на всіх експлуатаційних режимах двигуна з кільцевою жаровою трубою та 18-ма пальниками з попереднім змішуванням. Застосування двопаливного пальника, що працює за принципом двоступеневого спалювання («багата» та «бідна» суміші), дозволяє використовувати водопаливні емульсії (ВПЕ) у зоні первинного горіння. Це

сприяє стабілізації факела та забезпечує стійке займання основного виду палива. Значна частина попередніх наукових праць присвячена вивченню теплових двигунів без формування деталізованих фізичних моделей бездетонаційного згоряння. Натомість оцінка стійкості робочих процесів та ідентифікація детонаційних явищ базувалася переважно на методах емпірико-статистичного аналізу.

Згідно з дослідженнями [40], використання низькокиплячих присадок у ролі мікрорезонаторів дозволяє ефективно поглинати акустичну енергію. Для максимальної інтенсивності цього процесу розміри поглиначів мають відповідати резонансним параметрам, за яких частота їхніх пульсацій збігається із частотою зовнішнього хвильового впливу [41].

Оптимальна концентрація низькокиплячих присадок має забезпечувати повне поглинання акустичної енергії мікрорезонаторами. Згідно з дослідженнями [40], доцільно використовувати як добавки горючі речовини, що дає змогу зберегти високий рівень енергетичної ефективності теплового двигуна. Згідно з дослідженнями [41], на резонансній частоті $\omega_{\text{рез}}$ мікрорезонатори здатні автономно поглинати акустичну енергію з потоку рідини. Відповідно до розробленої моделі, такий механізм енергообміну забезпечує перехід теплового двигуна у стійкий режим роботи.

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].

Встановлено, що при частотах $\omega < \omega_{\text{рез}}$ спостерігається розходження пухирців, тоді як за умов $\omega > \omega_{\text{рез}}$ вони схлопуються відбувається їхнє схлопування. Оптимальним режимом є стан резонансу $\omega = \omega_{\text{рез}}$, за якого взаємодія між пухирцями відсутня. Це дозволяє зберегти пухирці-резонатори як стабільні структури, що забезпечують ефективне поглинання акустичної

енергії динамічного потоку в камері згоряння.

Роль неоднорідностей у резонаторі можуть виконувати парові бульбашки, що виникають внаслідок скипання крапель води у складі водопаливної емульсії (ВПЕ). Їхня присутність сприяє розширенню сплесків акустичної енергії та хаотизації спектра, що забезпечує ефективне демпфування акустичної нестійкості. Значний потенціал для стабілізації процесу горіння мають хімічно активні радикали, що виникають під час окиснення вуглеводневого палива та зберігаються в продуктах згоряння протягом періоду рекомбінації. Введення таких часток у якості присадок до основного палива дозволяє суттєво розширити межі стійкості та стабільності факела [24]. Серед сучасних підходів до стабілізації горіння особливу увагу привертає інтенсифікація спалювання вуглеводневого палива за допомогою низькотемпературної плазми. Зокрема, у праці [24] описано конструкцію реактора, де електрична дуга забезпечує підпал та стабільне вигорання паливоповітряної суміші. Проте суттєвим недоліком такої схеми є інтенсивне коксування стінок реакційної камери продуктами піролізу, що призводить до дестабілізації робочого процесу.

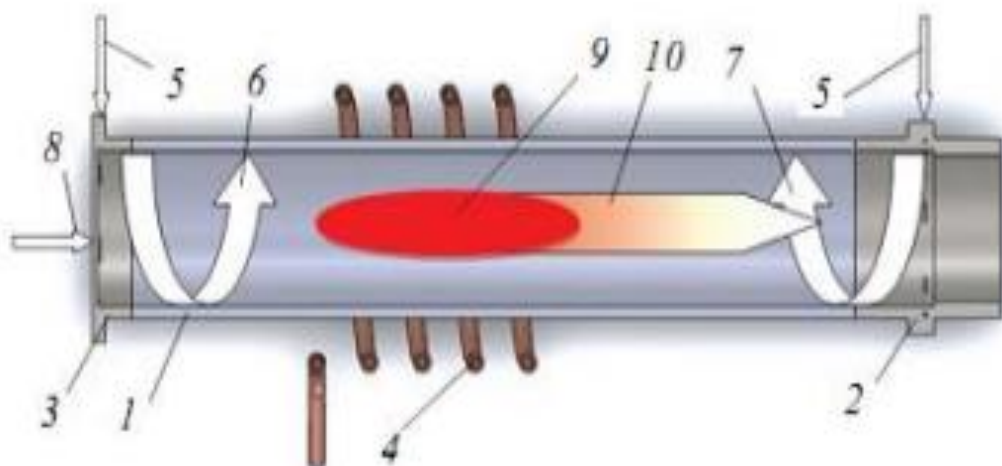


Рисунок 1.6 – Схема роботи височастотного індукційного плазмотрона: 1 – індукційна секція; 2 – вихідна секція; 3 – входна секція; 4 – мідна трубка; 5 – плазмоутворюючий газ; 6 – прямий вихор; 7 – зворотний вихор; 8 – подача палива; 9 – плазма; 10 – плазмовий факел

Конструкція входної секції передбачає наявність завихрювача для подачі

плазмоутворюючого газу 5 (аргону або повітря) у плазмотрон. Водночас перфорація вихідної секції дозволяє вводити горючу суміш 8 або інші види палива, зокрема водопаливні емульсії (ВПЕ).

Стійкість процесу горіння забезпечується інтенсивною дифузією радикалів у паливоповітряному середовищі та формуванням специфічної гідродинамічної архітектури потоку. Результати стендових випробувань та апробація плазмової системи ініціювання на повнорозмірних авіаційних ГТД підтвердили ефективність даного методу та обґрунтували доцільність його подальшого впровадження. Перехід суднової газотурбінної галузі на важкі сорти палива (мазути Ф5, Ф12 та моторне паливо ДМ) спричиняє додаткові труднощі в експлуатації форсунок, чия ефективність безпосередньо залежить від фізико-хімічних параметрів пального. З огляду на це, актуальним стає пошук альтернативних методів забезпечення дрібнодисперсного розпилення та інтенсифікації змішування палива з первинним повітрям у камері згоряння.

Паливо, що надходить через трубку 1 до приймального патрубку, змішується з повітряним потоком у равлику. Сформована паливоповітряна суміш спрямовується до лопаткового апарату центрального завихрювача для набуття тангенціального закручення.

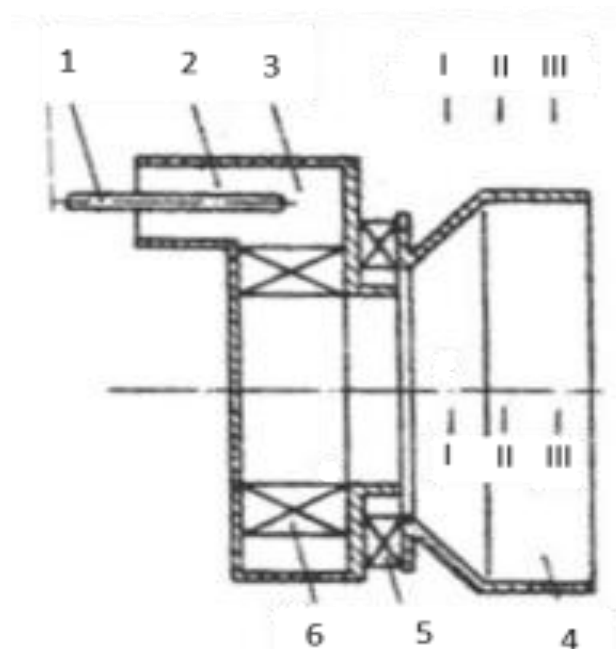


Рисунок 1.7 – Схема фронтового безфорсункового пристрою:
I, II, III – перетини вимірів параметра потоку

Взаємодія низькотемпературної плазми з паливом у реакторі або на межі закрученого струменя ініціює формування надрівноважних концентрацій активних центрів (H , CH_3 , O , OH й ін.) та продуктів часткового окиснення C і H_2 . Завдяки інтенсивній дифузії ці активні радикали швидко проникають у головний об'єм паливоповітряної суміші, виступаючи потужними промоторами процесу горіння. Ефективність використання форкамерно-факельної організації горіння зумовлена високою хімічною активністю продуктів неповного згоряння багатих сумішей. Активні компоненти форкамерного факела інтенсифікують процес: скорочується період затримки запалювання, зростає швидкість та повнота вигорання основного палива, а також розширюється робочий діапазон камери згоряння. Дослідження самозапалювання метану, н-бутану, ізооктану та н-гептану в турбулентному потоці (823–1423 К) підтверджують, що присутність продуктів недожогу дозволяє скоротити час затримки запалювання на порядок або знизити температурний поріг займання майже вдвічі.

Дослідження процесів горіння розпиленого гасу та цетану підтвердили, що ефект промотування в цих умовах ідентичний тому, що спостерігається під час спалювання гомогенних сумішей [36].

Аналіз впливу активних продуктів на кінетику горіння гасу в модельній камері підтвердив, що підвищення концентрації активних часток у потоці інтенсифікує процес. Зокрема, встановлено зростання турбулентної швидкості поширення полум'я, скорочення протяжності зони горіння та підвищення показників сумарної повноти згоряння [37].

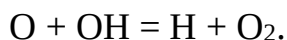
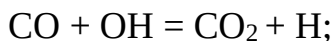
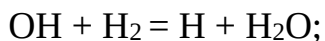
Аналіз кінетики високотемпературного окиснення метану в повітряно-плазмовому струмені (за умов миттєвого змішування та збереження ентальпії й тиску) виявив критичну залежність виходу атомарного водню від експозиції палива в реакторі та вихідної температури плазми. Зокрема, при $T_{пл} = 3000$ К пікові концентрації H досягаються в сумішах із $\alpha = 0,6-0,7$ за надкороткий час $\tau = 5 \cdot 10^{-6}$ с, тоді як для багатих сумішей $\alpha = 0,1$ цей час зростає до $\tau = 8 \cdot 10^{-4}$ с. Основні механізми формування надрівноважного вмісту атомів водню

представлені наступним переліком реакцій:



де М – будь-який компонент реагуючої системи.

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



На основі експериментального аналізу сумарного вмісту активних часток у плазмохімічному факелі (паливо — гас) авторами [45] встановлено суттєву залежність їхньої концентрації від часу перебування суміші в реакторі за умов $\alpha = 0,4-0,7$.

Встановлено, що активні продукти реактора виявляють суттєвіший вплив на кінетику вигорання бідних паливоповітряних сумішей порівняно зі збагаченими. Зокрема, при додаванні 5 % продуктів реактора інтенсифікація горіння є більш вираженою для суміші з $\alpha = 1,1$ і 0,8, ніж для $\alpha = 1,1$. Слід зазначити, що подальше підвищення концентрації активних добавок до 15 % не спричиняє значного додаткового прискорення процесу спалювання.

Кінетичні розрахунки демонструють значний вплив продуктів реакції на індукційний період та величину уявної енергії активації стехіометричних сумішей. Зокрема, при температурі 1600 К у зоні змішування, введення до 15% добавок спричиняє скорочення затримки запалювання майже вдесятеро, паралельно знижуючи енергію активації на 15–25%.

Аналіз отриманих даних свідчить, що взаємодія повітряної плазми з вуглеводневим паливом запускає низку плазмохімічних реакцій, результатом яких є формування високотемпературного плазмово-паливного факела. Завдяки високій турбулентності та надлишковій концентрації хімічно активних продуктів, такий факел інтенсифікує окиснення бідної паливоповітряної суміші. Це дозволяє знизити енергію активації, а також суттєво підвищити швидкість і повноту згорання палива.

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

2.1 Процес виникнення коливань при горінні паливних сумішей

Оскільки спалювання водомазутної емульсії (ВМЕ) супроводжується мікровибухами крапель, що ініціюють осциляції газового потоку, теоретичний аналіз термоакустичних явищ у топковій камері слід базувати на дослідженні механізму фазових перетворень. Класифікація нестійкості горіння зазвичай базується на частотному спектрі коливань. Низькочастотна нестійкість виникає, коли довжина хвилі значно перевищує габарити камери згоряння та паливоподачі. За таких умов енергетичну установку доцільно моделювати як систему інерційних та пружних ланок, де акустичні властивості камери не є визначальними, що дозволяє розглядати її як акустичну ємність. Основними методами демпфування таких коливань є нарощування перепаду тиску на форсунках, збільшення об'єму камери, а також корекція геометрії паливопроводів (збільшення відношення їхньої довжини до діаметра).

Найбільшу загрозу становить високочастотна (акустична) нестійкість горіння, за якої частота коливань збігається з власними акустичними частотами камери згоряння. Оскільки в системі виникають високочастотні поздовжні та поперечні коливання, вплив паливоподачі зазвичай вважається несуттєвим. Ключовими чинниками розвитку такої нестійкості є затримка самозаймання, варіативність тривалості підготовчих етапів, а також динаміка хімічних реакцій під дією пульсацій тиску й температури. Для стабілізації процесу доцільно використовувати антипульсаційні перегородки на форсункових головках, інтенсифікувати впорскування летких компонентів, а також застосовувати акустичне облицювання або резонатори Гельмгольца для демпфування енергії коливань. Зниження власних частот коливань у великогабаритних камерах згоряння зумовлює зростання впливу хвильових

характеристик системи паливоподачі. Це призводить до виникнення нестійкості робочого процесу в діапазоні проміжних частот.

Встановлено, що у форсажних камерах двигунів можуть виникати поздовжні коливання високої частоти (до 3000 Гц). Причиною цього явища є недосконале сумішоутворення, яке супроводжується мікровибухами крапель водомазутної емульсії [34].

Склад пальної суміші, а також геометрія та розміри стабілізатора в поєднанні з параметрами потоку можуть спричиняти самозбудження звукових коливань. Частота цих коливань зазвичай корелює з власними акустичними частотами газу в каналі [28, 29].

Аналіз результатів експериментальних досліджень дає підстави для наступних узагальнень:

1. Вібраційне горіння класифікується як автоколивальний процес, оскільки генерація акустичних коливань газу має спонтанний характер.
2. Ефект самозбудження звукових хвиль характерний для установок, де процес горіння супроводжується інтенсивним теплообміном між газовим середовищем, стінками камери та нагрітими елементами в її об'ємі.
3. Механізм акустичних коливань ініціюється появою елементарних збурень, амплітуда яких поступово зростає до моменту стабілізації процесу, що класифікується як „м'який“ режим вібраційного горіння. Натомість у камерах згоряння двигунів нестійкість часто провокується початковим імпульсом тиску під час пуску; такий тип збудження автоколивань визначають як „твердий“ режим [1].
4. Виникнення вібраційного горіння в камерах згоряння високонапружених енергоустановок є деструктивним процесом, що зумовлює необхідність впровадження спеціалізованих технічних рішень для його нівелювання.

Генерація коливань у суцільних середовищах виступає ефективним інструментом інтенсифікації процесів в енергоустановках. Зокрема, у коливних потоках спостерігається значне прискорення тепломасообміну, включно з випаровуванням та сумішоутворенням [20], а також активізація

коагуляції аерозолів і процесів сорбції [21]. Застосування режиму вібраційного горіння додатково забезпечує зростання теплонапруженості топки та повноти окиснення палива порівняно зі стаціонарними режимами [22].

Генерація термодинамічних коливань можлива в системі, що функціонує за принципом резонатора Гельмгольца (сполучення ємності та вузької труби, довжина якої значно поступається довжині звукової хвилі). У контексті спалювання водомазутних емульсій (ВМЕ) аналогом такого резонатора виступає конструкція "камера згоряння – газохід". Процес самозбудження коливань детермінований температурним градієнтом між стінками камери та горлом пристрою, що має перевищувати критичний поріг. Крім того, виникнення ефекту залежить від дотримання певного діапазону середньої швидкості газів у трубі та досягнення джерелом тепла граничної потужності [13].

2.2 Основні теоретичні підходи до вивчення термоакустичних коливань

Основоположну гіпотезу про те, що акустичні коливання підтримуються за умови підведення максимальної кількості теплоти в момент найвищого стиснення газу, вперше висунув Релей. Теоретичне підтвердження цього припущення було представлено у працях Патне та Денніса [14, 15]. Згідно з їхніми висновками, збудження коливань відбувається, якщо абсолютне значення фазового зсуву між коливаннями тиску та інтенсивністю теплопідводу не перевищує $\pi/2$. Натомість при значенні зсуву в діапазоні від $\pi/2 \dots \pi$, спостерігається демпфірування (гасіння) коливань. У дослідженні [26], присвяченому нестійкості горіння в двигунах, автори доводять справедливості критерію Релея і для таких систем. Ключовою особливістю є те, що в розрахунках акцент зміщується з швидкості тепловиділення на динаміку утворення газоподібних продуктів згоряння. Ключовою перешкодою у дослідженні автоколивальних процесів під час горіння є складність їхнього

математичного моделювання. Це зумовлено насамперед вираженою нелінійністю фізико-хімічних властивостей процесу, що вимагає розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних. Додаткову складність вносить нелінійна природа механізмів зворотного зв'язку, причому навіть за умови лінійної апроксимації знаходження розв'язків залишається трудомістким математичним завданням.

У роботі [27] проведено аналіз факторів, що спричиняють вібраційне горіння при спалюванні газоподібного та рідкого палива в системах, аналогічних резонатору Гельмгольца. Досліджено модель низькочастотної нестійкості, де камеру згоряння представлено як пружний об'єм, систему подачі — як інерційну ланку, а сопло — як ланку витікання. Ключовою умовою застосування такої моделі є значне перевищення довжини хвилі коливань над геометричними розмірами зазначених елементів.

Для аналізу внутрішньокамерної нестійкості застосовується модель чутливого часу запізнювання, при цьому динаміка системи подачі палива в розрахунках не враховується. Суттєвою перевагою вивчення вібраційного горіння в зосереджених системах є можливість опису їхнього стану за допомогою звичайних диференціальних рівнянь. Така математична формалізація дає змогу залучити апарат теорії автоматичного керування (ТАК) для визначення критеріїв виникнення автоколивань [18].

Застосування енергетичного методу дозволяє поглиблено проаналізувати фізичну природу самозбудження коливань та встановити відповідні критерії нестійкості [19]. Даний підхід продемонстрував високу ефективність при розв'язанні складних задач теорії вібраційного горіння з нелінійними характеристиками, що, зокрема, дозволило надати математичне обґрунтування критерію Релея. Розвиток акустичних коливань у газовому середовищі зумовлений переважанням енергії горіння A_d над акустичними втратами A_c . Стан динамічної рівноваги, що визначає межу стійкості системи, досягається за умови $A_c = A_d$. Початкова фаза процесу характеризується лінійною залежністю між інтенсивністю тепловиділення та флуктуаціями

тиску або швидкості потоку. Подальше зростання амплітуди коливань обмежується нелінійними властивостями процесу горіння, а також збільшенням дисипації енергії через в'язкість газу та звукове випромінювання.

Стабілізація амплітуди відбувається при повторному вирівнюванні генерованої та втраченої енергій.

Справедливість критерію $A_c = A_d$ підтверджена класичними дослідженнями стійкості в резонаторах Гельмгольца, трубках Рійке та установках Зондхаусса.

2.3. Особливості процесу мікрровибуху 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 мікрровибухів, 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. Волога, що міститься у паливних краплях, здатна досягати перегрітого стану. При цьому інтенсивність перегріву є функцією двох ключових параметрів: об'ємного газовмісту води α та радіуса водяної краплі R_v .

Як зазначено у працях [27, 28], позитивний ефект вторинного розпилення, який прискорює горіння, максимально проявляється при високій концентрації великих крапель у факелі. Якщо $R_k > R_v$, такі краплі здатні утримувати великі водяні включення, причому зростання радіуса включення R_v призводить до зниження температури початку фазового переходу. Механічне руйнування краплі відбувається за умови переважання кінетичної енергії мікрровибуху $E = 2\pi \check{R}^2 \cdot R^3$ над силами поверхневого натягу. Використовуючи модель Релея, величину $\check{R}$ і її об'єму R^3 . Згідно з

експериментальними даними [11], краплі водопаливної емульсії відзначаються меншим періодом затримки запалювання порівняно з безводним паливом. Цей ефект зумовлений вторинним розпиленням палива внаслідок мікрровибухів. Встановлено, що для крапель діаметром $d > 10^{-4}$ м механізм пароутворення має гетерогенну природу, де центрами кипіння виступають парогазові включення у водяній фазі. Враховуючи полідисперсність реального факела, науковий інтерес становить дослідження теплофізичних процесів та фазових переходів у краплях широкого діапазону розмірів $5 \cdot 10^{-6} \leq d_k \leq 1 \cdot 10^{-3}$ м.

У дослідженні висвітлено закономірності перебігу процесів у краплях водопаливної емульсії (ВПЕ) на етапі від початкового термічного впливу до моменту займання. Встановлено, що нагрівання палива зумовлює мікрровибухове закипання водяної фази, при цьому механізм пароутворення може реалізовуватися за гетерогенною або гомогенною схемами залежно від умов протікання процесу.

Згідно з даними [22], за стабільної температури поверхні мікрровибухи передусім характерні для крапель великого розміру з високою концентрацією вологи. Це зумовлено підвищеною ймовірністю виникнення в них нестійких центрів пароутворення. Водночас у дрібнодисперсних краплях емульсії випаровування води відбувається за вищих температур. Така закономірність зумовлює відмінності в механізмах запалення: малі краплі можуть займатися ще до моменту формування в них парової фази.

Встановлено, що при температурі середовища $T_c > 750$ °С займання крапель води відбувається миттєво після скипання водяної фази, тоді як при $T_c < 750$ °С спостерігається збільшення періоду затримки запалення. Параметри водовмісту суттєво впливають на теплофізичні характеристики палива: при $W^p > 0,1$ зростання теплоємності та теплопровідності емульсії уповільнює процес прогріву крапель порівняно з чистим мазутом. Водночас при низькому водовмісті $W^p < 0,05$ теплофізичні показники стабілізуються,

проте через нестачу центрів пароутворення підвищується температура фазового переходу. Практичний інтерес становить порівняльний аналіз тривалості прогріву до моменту займання для крапель безводного палива та водопаливної емульсії (ВПЕ). Експериментальні дані для крапель діаметром $d = (1...2) \cdot 10^{-3}$ м підтверджують, що емульговані суміші займаються швидше. Варто зазначити, що інтенсифікація горіння при використанні ВПЕ спостерігається переважно в умовах недосконалого розпилення палива. Структурно час прогріву нерухомої краплі складається з періодів попереднього нагріву $\tau_{\text{п}}$, випаровування $\tau_{\text{в}}$ та хімічної індукції $\tau_{\text{х}}$. При цьому сума $(\tau_{\text{п}} + \tau_{\text{в}})$ корелює з квадратом діаметра краплі, тоді як $\tau_{\text{х}}$ залежить від властивостей палива та температури середовища. У разі, якщо займання обводненої краплі відбувається до фазових перетворень води, процес ідентичний горінню чистого палива. В іншому випадку механізм включає стадії нагрівання до фазового переходу $\tau_{\text{к}}$, мікрровибуху (розпаду краплі) та подальшого випаровування новоутворених часток.

Варто зауважити, що в межах аналізованої схеми визначальну тривалість мають лише етапи нагрівання до початку фазових переходів та хімічної індукції. Процес закипання води відбувається вибухоподібно, а дрібнодисперсні краплі, що виникають внаслідок мікрровибуху, прогріваються та випаровуються істотно швидше за первинні великі фракції.

Отже, оцінити період затримки займання краплі емульсії можна шляхом зіставлення її показника $\tau_{\text{к}}$ із сумарною величиною $(\tau_{\text{п}} + \tau_{\text{х}})$ для безводного палива. При цьому розрахунок $\tau_{\text{к}}$ здійснюється теоретичним шляхом за методикою [22], а параметр займання K визначається на основі емпіричної залежності [24]:

$$K = d^2 / (\tau_{\text{п}} + \tau_{\text{х}}).$$

При незмінному значенні $T_{\text{с}}$ залежність діаметра краплі від вологовмісту описується рівнянням виду $\tau_{\text{к}}(d, T_{\text{с}}, \varphi) = d^2 / K$. Прискорення процесу займання при застосуванні водопаливних емульсій (ВПЕ) є найбільш імовірним для

крапель значного розміру, формування яких характерне для тривалих режимів експлуатації певних типів парових котлів

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

Вивчення термоакустичних явищ у камерах згоряння при спалюванні водопаливних емульсій (ВПЕ) є ключовим етапом для підвищення енергоефективності процесів. Основним інструментом для моделювання таких процесів виступає резонатор Гельмгольца — експериментальна установка у формі контейнера з вузькою трубкою, довжина якої суттєво поступається довжині звукової хвилі.

Вивчення термоакустичних явищ у камерах згоряння при спалюванні водопаливних емульсій (ВПЕ) є ключовим етапом для підвищення енергоефективності процесів. Основним інструментом для моделювання таких процесів виступає резонатор Гельмгольца — експериментальна установка у формі контейнера з вузькою трубкою, довжина якої суттєво поступається довжині звукової хвилі.

Генерація коливань у суцільних середовищах є ефективним інструментом інтенсифікації промислових процесів. Доведено, що коливальні потоки суттєво прискорюють тепломасообмін, зокрема сумішоутворення, випаровування та теплопередачу між газом і поверхнями. Крім того, вони сприяють активнішій агломерації частинок, коагуляції аерозолів, а також процесам адсорбції та десорбції [23, 25]. Застосування вібраційного горіння дозволяє підвищити теплове напруження камери згоряння та забезпечити вищий ступінь вигорання палива порівняно зі стаціонарним режимом. Прикладом такої системи є резонатор Гельмгольца, де камера виконує роль акустичної ємності з періодичним стисненням і розрідженням газу, а продукти згоряння коливаються у його "горлі" (резонансній трубці). Аналогічні пристрої, зокрема двотрубні конструкції з окремими камерою та резонансною

частиною (див. рис. 2.1), детально розглянуті у праці [26].

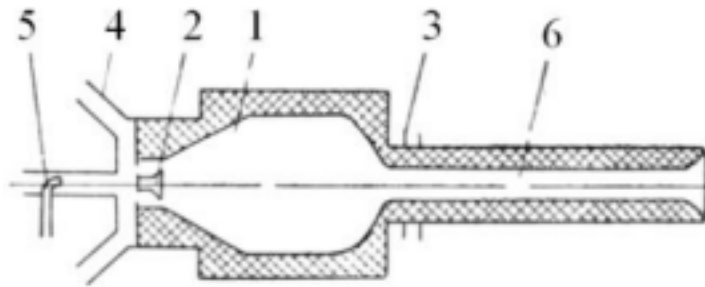


Рисунок 2.1 – Вібраційна камера згоряння: 1 – основна частина камери; 2 – стабілізатор; 3 – вхід вторинного повітря; 4 – первинний повітрозабірник; 5 – сопло; 6 – резонансна трубка

Термічна неоднорідність середовища, зумовлена присутністю нагрітих тіл у газовому потоці або градієнтом температур на стінках каналу, стає причиною генерації автоколивань. Даний ефект самозбудження акустичних хвиль характерний для таких систем, як трубка Рійке та нерівномірно нагрітий резонатор Гельмгольца.

За відсутності збурень потоку теплопередача зберігає стаціонарний характер. Періодична зміна інтенсивності теплопідводу, що є умовою збудження коливань, виникає внаслідок впливу акустичних хвиль на процес теплообміну між газом та поверхнею (нагрітим тілом або стінками). Зокрема, у трубці Рійке колювання швидкості середовища зумовлюють циклічну зміну тепловіддачі. Характеристики цього процесу визначаються числом Струхала Sh : із його зростанням модуль функції передачі стрімко знижується, а фазовий зсув зростає, наближаючись до граничного значення $\pi/2$. Через теплову інерційність при високих значеннях Sh система не встигає реагувати на швидкі флуктуації швидкості, що призводить до затухання амплітуди коливань теплообміну. Досліджується динаміка полум'я в закритій трубці, оснащій вузьким каналом для впорскування паливо-повітряної суміші. У зв'язку з відсутністю наскрізного потоку дифузійні явища не враховуються. Акустичні збурення, що виникають у резонаторі, спричиняють поширення звукових хвиль у магістралі подачі, що трансформує безперервне надходження суміші

у періодичний процес. Коливання швидкості потоку призводять до відповідної модуляції швидкості тепловиділення під час горіння.

Досліджуваний механізм зворотного зв'язку базується на взаємодії коливань тиску в резонаторі, періодичної зміни витрати паливної суміші та відповідних пульсацій інтенсивності тепловиділення. Тривалість затримки горіння визначається фізико-хімічним складом суміші та геометричними параметрами (діаметром) сопла живильної трубки. Оскільки фронт полум'я реагує на зміну швидкості потоку з певним запізненням, цей процес має інерційний характер. З огляду на фізичну подібність процесів дифузії та теплообміну, можна стверджувати, що часові характеристики затримки дифузійного горіння корелюють із параметрами теплообміну в трубці Рійке [17]. В реальних умовах експлуатації наявність звужень, розширень або вигинів каналу вище за зону горіння, а також наявність слабкопроточних зон призводить до інтенсивного вихроутворення. У коливальному режимі цей процес набуває періодичного характеру: вихор проходить стадію росту, після чого відривається та переноситься потоком. Частота відриву таких вихорів корелює з періодом коливань швидкості. Крім того, формування стоячих хвиль у трубопроводі зумовлює появу вторинних течій, зокрема вихорів Релея в центральній частині потоку та вихорів Шліхтінга у пристінному шарі.

При наявності середньої швидкості потоку сформовані вихори транспортуються середовищем і вступають у взаємодію з фронтом полум'я. Деформація фронту під впливом кожного вихору зумовлює варіації локальної швидкості поширення полум'я. Це призводить до зміни інтегральної швидкості згоряння суміші та, як наслідок, інтенсивності тепловиділення. З огляду на це, критично важливим є врахування флуктуацій швидкості в зоні відриву вихорів. Сумарний час затримки тепловиділення визначається як сума часу транспортування вихору від точки відриву до зони реакції та часу затримки, спричиненої структурною перебудовою фронту полум'я під дією вихрових збурень. Згідно з дослідженнями [23], плоский фронт полум'я в потоці горючої суміші має здатність до посилення мікрозбурень швидкості та

тиску. Розміщення полум'я в акустичному резонаторі призводить до виникнення періодичних прискорень фронту під дією звукових коливань. Гідродинамічна нестійкість у такому випадку формує механізм зворотного зв'язку: коливання швидкості в трубці трансформують фронт полум'я у хвилеподібний, що спричиняє зміну площі його поверхні. Як наслідок, виникають пульсації інтегральної швидкості тепловиділення. Ці процеси інтенсифікуються під впливом змінного тиску, що сприяє якіснішому розпиленню, прискореному випаровуванню та нагріванню компонентів палива. При значних амплітудах тиску спостерігається суттєве зростання швидкості хімічних реакцій горіння [30].

При дослідженні спалювання рідкого палива в повітряному середовищі слід враховувати вплив акустичних збурень. Такі перешкоди зумовлюють коливання паливоподачі та зміну швидкості обтікання сопла повітрям, що створює умови для формування механізмів дифузійного та потокового зворотного зв'язку. Проте за умов високого тиску нагнітання палива його витрата стабілізується і може розглядатися як незмінна величина.

При розміщенні сопла у вузлі швидкості стоячої хвилі, де амплітуда коливань мінімальна, традиційні механізми зворотного зв'язку нівелюються. У такому разі визначальним стає час затримки горіння — сукупність процесів розпилення, випаровування та хімічного реагування палива. Чутливість цих фаз до варіацій тиску спричиняє періодичність тепловиділення, що створює умови для самозбудження акустичних коливань. Складність ідентифікації причин вібраційного горіння посилюється динамічною зміною механізмів: зі зростанням інтенсивності збурень хвилеподібна структура фронту полум'я трансформується у вихрову, а згодом — у дифузне об'ємне горіння без чітко окреслених меж.

2.5 Процес горіння окремих частинок вуглецю в акустично пульсуючому потоці

Впровадження керованих або використання спонтанних акустичних коливань у топочному просторі дозволяє значно оптимізувати процес спалювання палива. Перехід до пульсуючого режиму горіння забезпечує зростання теплонапруженості камери, мінімізацію механічного недожогу та зниження емісії оксидів азоту і сажі, одночасно інтенсифікуючи теплообмінні процеси в апараті. У дослідженні [20] розглянуто фізичні чинники, взаємодія яких зумовлює нелінійний вплив флуктуацій газу на процес згоряння вуглецевих частинок. Експериментальна база включала використання трубки Рійке як джерела акустичного поля. Об'єктом випробувань слугувало активоване деревне вугілля зі стабільними характеристиками: щільністю 500 кг/м^3 , мінімальною зольністю (до 1%) та відсутністю виходу летких сполук. На представленій термограмі (рис. 2.2) відображено процес горіння великої вугільної частинки діаметром близько 2,5 мм. Стрілками зафіксовано моменти активації та деактивації акустичних пульсацій. Експериментально встановлено, що перебування частинки в акустично коливальному потоці зумовлює підвищення температури її горіння. Крім того, зафіксовано скорочення часу теплової релаксації, що є прямим наслідком інтенсифікації горіння. Характерною особливістю є зростання швидкості температурних змін у моменти перемикавання режимів, що стає більш вираженим у міру вигорання вуглецю.

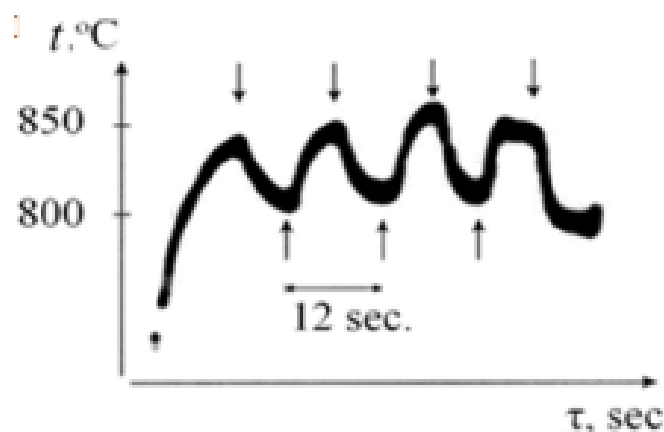


Рисунок 2.2 – Осцилограма зміни температури горіння великої частинки вугілля (2,5 мм) при вмиканні/вимкненні акустичних пульсацій

Аналіз рис. 2.2 дозволяє стверджувати, що в основі інтенсифікації горіння частинок через періодичне руйнування (знос) газової оболонки лежить не абсолютне значення амплітуди взаємного зсуву фаз «частинка-газ», а її відношення до діаметра частинки. Отже, цей визначальний оператор було представлено у вигляді залежності:

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

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 коливань, амплітуда зсуву A або амплітуда коливань 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.

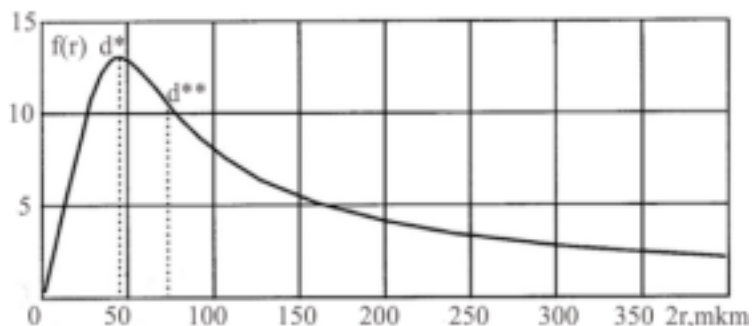


Рисунок 2.3 – Відносна величина амплітуди взаємного зсуву частинка-газ як функція розміру частинки

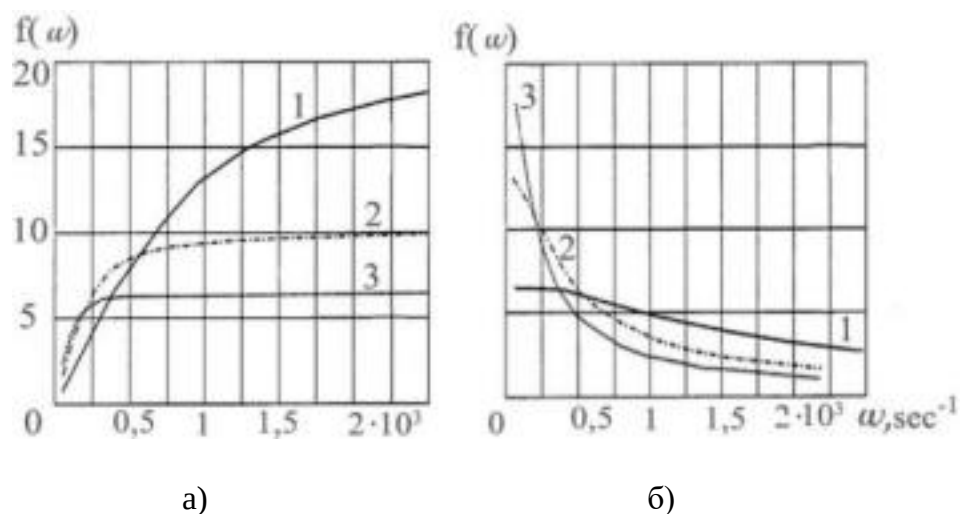


Рисунок 2.4 – Частотні залежності відносної амплітуди взаємного зсуву частинок і газу при фіксованій амплітуді зсуву (а) і при фіксованій амплітуді коливань швидкості (б) в акустичній хвилі (криві відповідають частинкам діаметром 40 мкм (1), 80 мкм (2) і 120 мкм (3))

Зростання частоти за умови сталої амплітуди зміщення A призводить до зниження інтенсивності залучення частинок у коливальний процес, через що функція $f(\omega)$ асимптотично наближається до межі $A/(2r)$. Натомість у режимі фіксованої амплітуди швидкості V_a спостерігається зворотна залежність: графік $f(\omega)$ демонструє спадний характер із підвищенням частоти.

Проведені дослідження та аналіз впливу пульсацій потоку на процеси горіння поодиноких часток вуглецю дозволили сформулювати такі основні положення:

- встановлено, що коливання акустичного потоку сприяють інтенсифікації процесу горіння окремих вуглецевих частинок. Цей ефект спостерігається для всього спектра досліджуваних розмірів — від 35 до 3500 мкм

- екстремальний характер залежності амплітуди відносного зсуву фаз від діаметра частинок d зумовлений інтенсивним зношуванням зони газофазної реакції в безпосередній близькості до частинки. Врахування цього фактора дозволяє пояснити фізичну природу виникнення максимуму на вказаній залежності. Наявність максимуму на кривій залежності $\varepsilon(d)$ пояснюється взаємодією двох чинників: інерційним залученням частинки до коливального

руху та зміною її відносного зміщення щодо газового середовища залежно від дисперсності. Теоретичні оцінки, побудовані на основі цього механізму, демонструють високу збіжність із експериментальними даними.

Ефективність мікрровибуху крапель палива безпосередньо залежить від концентрації води та ступеня дисперсності емульсії. Наявність дрібнодисперсних водяних включень трансформує механізм займання: під час нагрівання інтенсивне пароутворення всередині краплі призводить до її фрагментації на дрібніші частинки. Оскільки ключовий позитивний вплив води зумовлений саме зміною її фазового стану, вивчення передполум'яних процесів в емульгованому паливі має вагоме теоретичне та прикладне значення. Процес формування конкурентної фази при перегріві води реалізується за гомогенною або гетерогенною схемами. Гомогенний механізм характерний для ідеально чистих рідин і зумовлений розривом міжмолекулярних зв'язків, коли відстань між молекулами критично зростає. Проте для реальних середовищ, зокрема води, фактична межа міцності є значно нижчою через їхню структурну неоднорідність. Навіть у глибоко очищеній дистильованій воді зберігаються стабільні зародки парової фази — мікропорожнини, заповнені парогазовою сумішшю, природа стійкості яких залишається предметом дискусій. В основу теплофізичної моделі покладено гетерогенну схему конкурентної фази в перегрітій воді. Модель описує поведінку парогазових мікрозародків, які при досягненні критичної температури $T_{кр}$ втрачають стабільність і стрімко розширюються внаслідок інтенсивного фазового переходу. Для визначення концентрації та розмірного розподілу цих зародків застосовано метод аналізу імпульсного акустичного випромінювання, що виникає під час їхнього вибухоподібного росту.

Для вивчення процесів трансформації в краплях водопаливної емульсії було спроектовано термоакустичну установку (рис. 2.5). Конструкція містить термостат (1) та допоміжний охолоджувальний резервуар (2), заповнений високоякісним синтетичним маслом SAE 25W/50 (API CG-4/SJ), що зазвичай

застосовується у швидкісних турбодизельних двигунах [29].

Для дослідження використовували масло з температурою спінювання близько 395 °С та середньою густиною 853 кг/м³. Стабілізація заданого температурного режиму в термостаті здійснювалася за допомогою плоского електронагрівача, підключеного до регульованого джерела постійного струму.

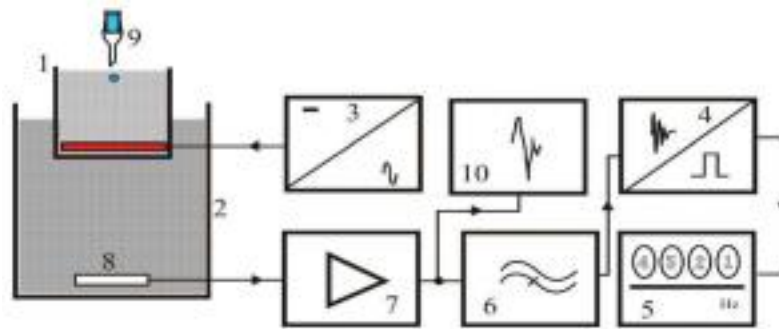


Рисунок 2.5 – Структурна схема дослідної установки:

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 контролю температурного режиму та запобігання перегріву понад точку Кюрі на дні допоміжної ємності було встановлено широкосмуговий п'єзокерамічний гідрофон (ПЗТ-10) дискової форми (діаметр 50 мм, товщина 1 мм). Процес підготовки паливної емульсії з необхідними параметрами водності та дисперсності здійснювався за допомогою механічного перемішування в режимі кавітації. Експеримент передбачав дозоване введення крапель емульсії в термостат із кроком нагрівання $\Delta T \equiv 10^\circ$ у діапазоні $T_{\min} = 387$ К до $T_{\max} = 570$ К. Акустична емісія, що виникала внаслідок вибухового закипання мікрооб'ємів води та фазових переходів, фіксувалася гідрофоном і описується таким 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.

Встановлено, що експоненціально затухаючі коливання з періодом

порядку 10^{-4} с виникають внаслідок резонансного збудження термостата та допоміжної ємності під дією мікровибухів води. Акустичний сигнал, що генерується радіальними коливаннями циліндричних поверхонь, реєструється п'єзоелементом (8). Після підсилення широкосмуговим пристроєм (7) сигнал проходить крізь фільтр низьких частот (6) для усунення структурних перешкод і фіксується осцилографом (10). Перетворювач (4) забезпечує трансформацію затухаючих імпульсів у прямокутні з крутими фронтами, а їх кількість підраховується цифровим частотоміром (5).

У межах краплі палива виникає радіальний градієнт температури з піковим значенням на її поверхні. Це зумовлює фазові перетворення частинок води в приповерхневому шарі, що призводить до поверхневого кипіння та ефекту розбризкування. Внаслідок серії мікровибухів формується «паливний туман» із дрібних фрагментів, що візуально виявляється як зростання яскравості факела в топці котла. Для крапель малого діаметра характерна гомогенна схема пароутворення на завершальних стадіях згоряння. Водночас для важких видів палива оптимальною є така дисперсність емульсії, яка забезпечує мікровибухове дроблення великих крапель на дрібніші фракції при мінімальній кількості водних включень.

Аналіз отриманих результатів підтверджує, що термічне розпилення крапель водопаливної емульсії в камері згоряння відбувається через механізм мікровибуху. Інтенсивність та характер цього явища безпосередньо залежать від дисперсності фаз та об'ємної частки води. Виявлено три типи трансформації водної фази, кожен з яких зумовлює специфічну механіку дроблення паливних крапель.

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

3.1 Виникнення високо- і низькотемпературної корозії при спалюванні рідких палив

В сучасній енергетиці використання важких низькоякісних рідких палив супроводжується гострими проблемами корозійного пошкодження та забруднення поверхонь нагріву котлів, а також вузлів ДвЗ і ГТД. Ключовим фактором, що визначає характер високотемпературної корозії та інтенсивність зносу, є наявність мінеральних сполук у паливі. Крім того, ці компоненти суттєво впливають на розвиток низькотемпературної сірчанокислотної корозії. Взаємодія продуктів згоряння, що містять кисень та пари сірчаної кислоти, із металевою поверхнею зумовлює два паралельні процеси (рис. 3.1): окиснення сталі з формуванням оксидів заліза та хімічну реакцію сталі з кислотою, що супроводжується утворенням сульфатів [70-73].

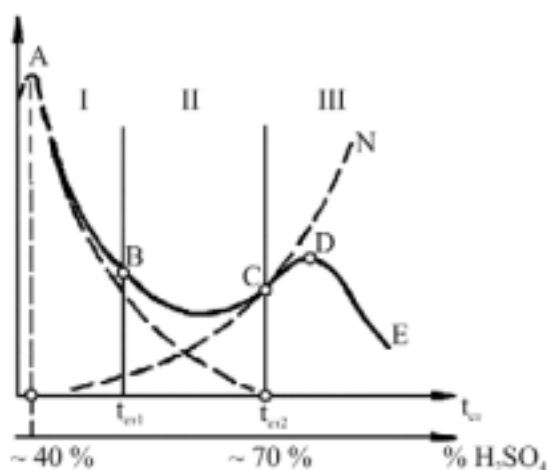


Рисунок 3.1 – Крива залежності швидкості корозії від температури стінки

Взаємодія зазначених процесів зумовлює формування двох характерних ділянок: у першій зоні (ділянка AB) загальна швидкість корозії K_K корелює зі швидкістю реакції металу з кислотним середовищем, що супроводжується утворенням сульфатів. У другій зоні (ділянка BC) спостерігається зближення

швидкостей обох процесів, що призводить до появи мінімуму на сумарній кривій корозійних втрат. Основними продуктами корозійних процесів є оксиди та сульфати заліза.

У температурному діапазоні стінки $t_{\text{ст}} > 90...110$ °C відбувається конденсація розчину H_2SO_4 із концентрацією понад 70 %. За таких умов агресивність кислоти щодо сталі знижується, що призводить до пасивації металевої поверхні. Це запобігає утворенню сульфатів заліза та уповільнює газову корозію. Такий механізм зумовлює формування третьої корозійної зони, яка характеризується піковими значеннями на кривій швидкості корозії (ділянка DE). Наявність екстремуму (мінімуму) швидкості корозії при температурі стінки $t_{\text{ст}} \approx 80$ °C пояснюється генерацією туману сірчаної кислоти — явищем, характерним і для контактного методу виробництва сульфатної кислоти [24]. Конденсація пари з формуванням дрібнодисперсного кислотного туману відбувається за умови досягнення критичного перенасичення $S > S_{\text{кр}}$. Після проходження піка перенасичення, зокрема внаслідок фазового переходу в туман, інтенсивність конденсації кислоти на поверхні зменшується. Результати багатократних вимірювань температури точки роси, отримані за методикою аналізу швидкості наростання струму між електродами $di/d\tau = f(t_{\text{ст}})$, (що відображає кількість конденсації кислоти), підтверджують екстремальний характер залежності адсорбованої вологи від температури (рис. 3.2).

Зокрема, при аналізі електрорушійної сили $dE/dx = f(t_{\text{ст}})$, також зафіксовано наявність максимуму та мінімуму. Варто зауважити, що зі зростанням вмісту води в паливі спостерігається помірне підвищення максимального значення ЕРС та його зміщення в область нижчих температур [15] (рис. 3.3). Досягнення температурного максимуму кислотної агресивності визначається хемосорбцією, тоді як при нижчих температурах переважає активована хемосорбція. Наявність цих етапів зумовлює характерні екстремуми на кривій залежності швидкості корозії від температури

стілки, що підтверджується експериментальними даними.

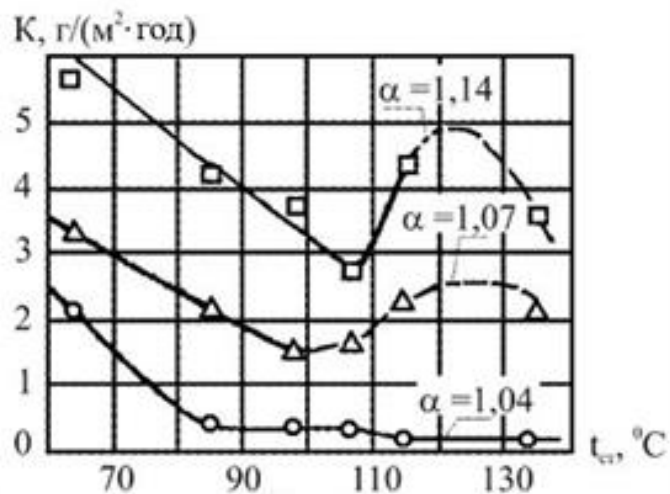


Рисунок 3.2 – Оцінки інтенсивності корозійного процесу шляхом прямих вимірювань швидкості корозії

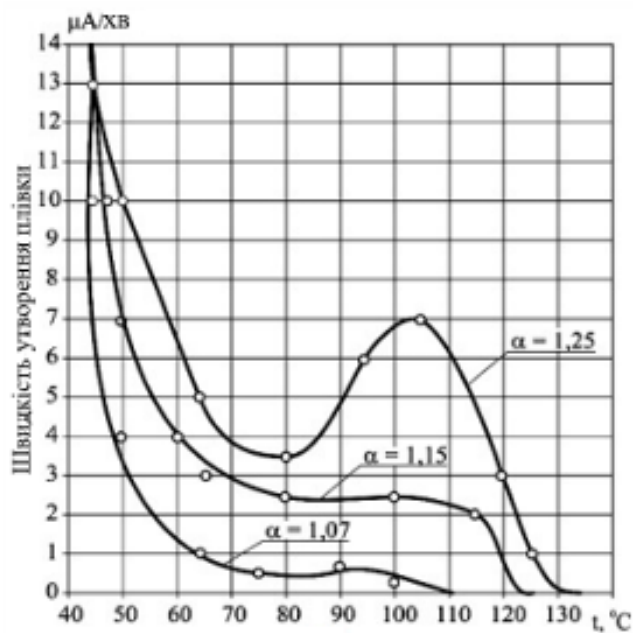


Рисунок 3.3 – Оцінка інтенсивності корозійного процесу шляхом вимірювання швидкості зміни струму di/dt

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).

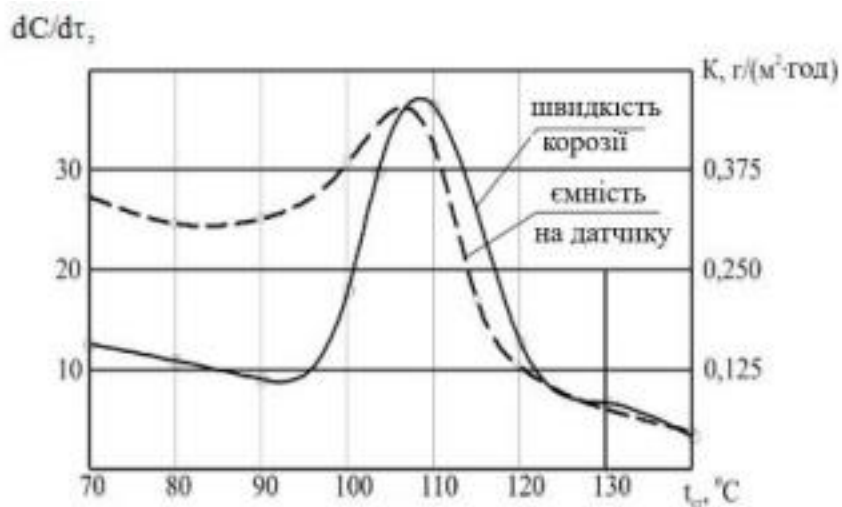


Рисунок 3.4 – Оцінка інтенсивності корозійного процесу шляхом вимірювання зміни швидкості зміни ємності

Збільшення швидкості корозії при зміні вологості від 0 до 15...25 % порозумівається зменшенням омичного опору виникаючих корозійних елементів [16]. При вологості відкладень більше критичної дифузія деполяризаторів 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 [17] 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 водовмістом 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 °C 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 мікровибухів цих крапель; склад і якість газів, що виділяються; розміри та обсяги твердих часток, а також інтенсивність низькотемпературної і високотемпературної корозії.

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 сірчанокислотна 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), їх властивостей та способів підготовки. Особлива увага приверталася на рівень дисперсності та необхідність забезпечення стабільності одержуваних ВПЕ [18, 31]. Приводяться також дані про істотне поліпшення процесів горіння внаслідок мікровибухів крапель водопаливних емульсій, що дозволяє підвищити рівень економії палива, а також відомості про зниження емісії шкідливих речовин у димових газах. 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 [16]). За даними [36] 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 . Зокрема для котельних установок важливе значення має забезпечення оптимального надлишку та вологості повітря. 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 $OH^\cdot$ [38]. 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 [18] 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 [21]. 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 сірчано-кислотного виробництва по нітрозному механізму [12], 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 [19], у яких розглядається вплив Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- без урахування впливу спалювання ВПЕ; вплив присадок на стан металу [17]; методи боротьби з наслідками корозії [18], 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 [19]. 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 сірчаноокисlotної 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.

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 вентиля 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).

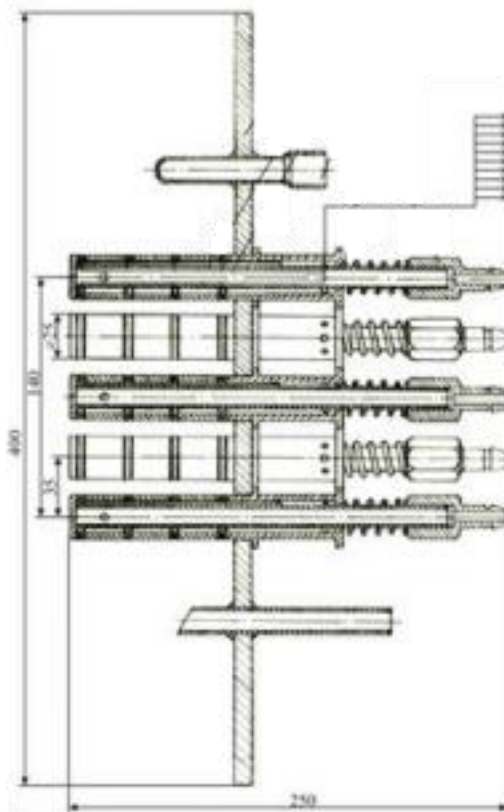


Рисунок 3.6 – Загальний вид труб-зразків робочої ділянки для дослідження високотемпературної корозії

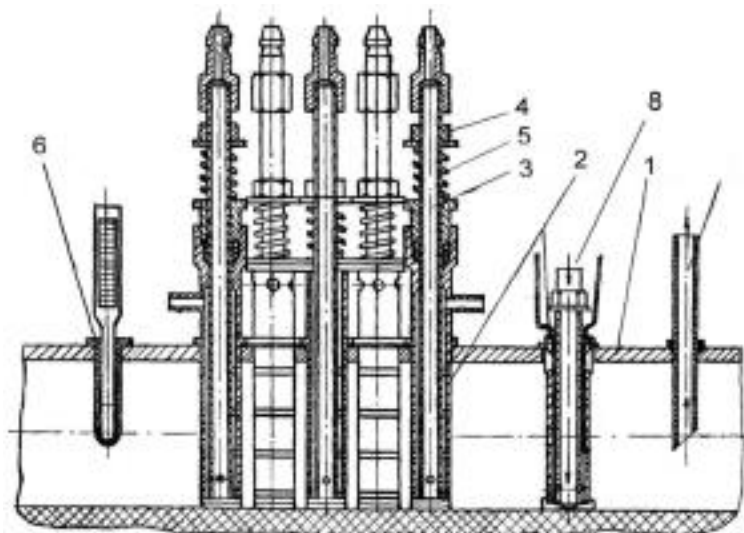


Рисунок 3.7 – Загальний вид труб-зразків робочої ділянки для дослідження низькотемпературної корозії

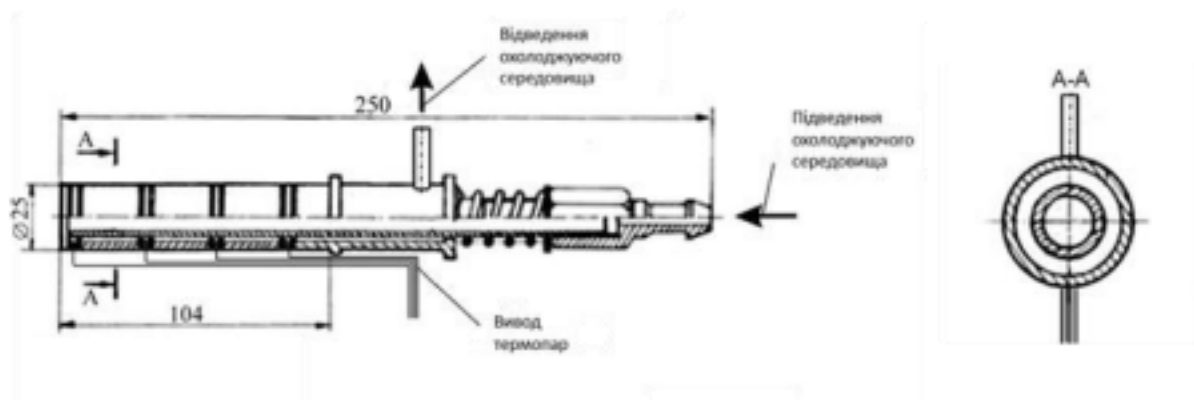


Рисунок 3.8 – Загальний вид труб-зразків з охолодженням рідким теплоносієм

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 трубою 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. 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 мікроривів 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.

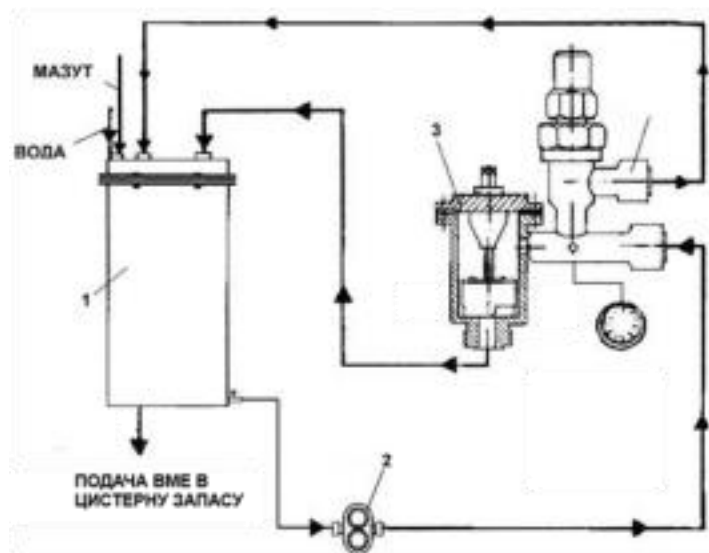


Рисунок 3.9 – Схема установки для приготування водопаливної емульсії

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 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 $\sim 1000^\circ\text{C}$ при дослідженнях високотемпературної корозії та $\sim 200^\circ\text{C}$ 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 емульсій на його основі, значень викидів NO_x , SO_2 , CO_2 контролювалися за допомогою хроматографів Газохром-3101 і ОКСИ-5М (відносна погрішність на рівні $\pm 5 \%$). Сталість витрати палива (погрішність виміру $\pm 1 \%$) під час проведення експерименту контролювалося по стабільності температури газів на виході з камери згоряння установки на рівні $1200^\circ C$ за допомогою спеціальної екранованої відсмоктувальної термопари. Точність вимірів температур складала $\pm 5^\circ C$. Діапазон зміни солевмісту водопаливної емульсії становив $17...490 \text{ мг/дм}^3$, 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 денце 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).

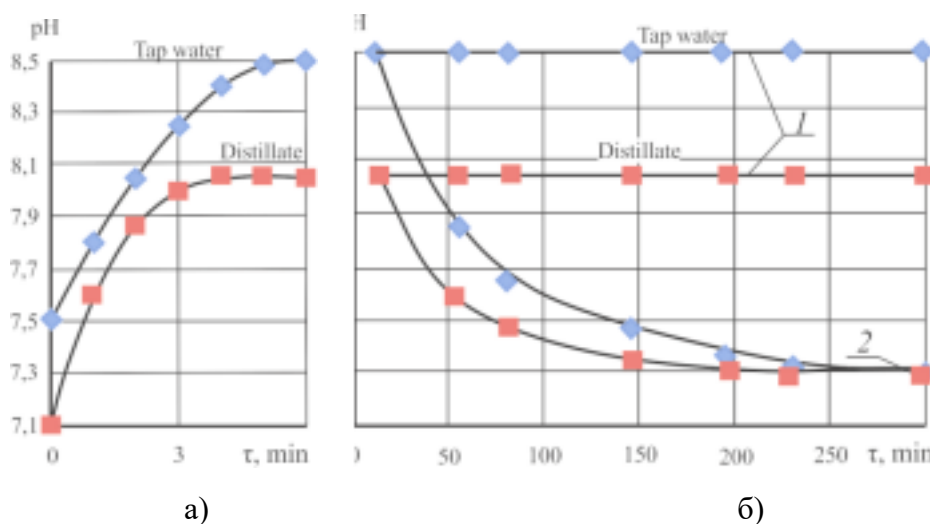


Рисунок 3.10 – Активність води в емульсії при кавітаційно-циркуляційній підготовці: а) активація води при кавітаційній підготовці водомазутної емульсії; б) час втрати активності води в підготовленій водомазутній емульсії; 1 - підтримка постійного значення активності у ВПЕ; 2 - стабільний стан ВМЕ (відсутність 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 °C при спалюванні мазуту і водомазутних емульсій з різним водовмістом (від 2 до 30 %) отримані залежності витрат водомазутної емульсій (рис. 3.11, крива 1) і чистого палива в них (крива 2, Data NUS). Також проведено порівняння з аналогічними даними [10] (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.

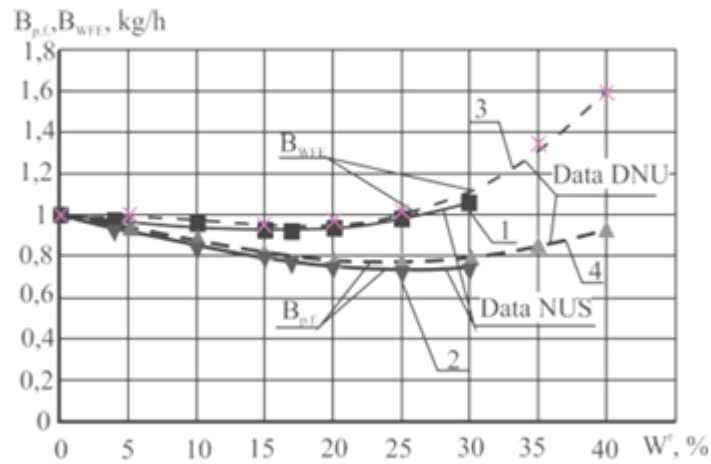


Рисунок 3.11 – Залежності витрати водопаливних емульсій B_{WFE} і чистого палива B_{pf} від водовмісту W^p водопаливної емульсії

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.

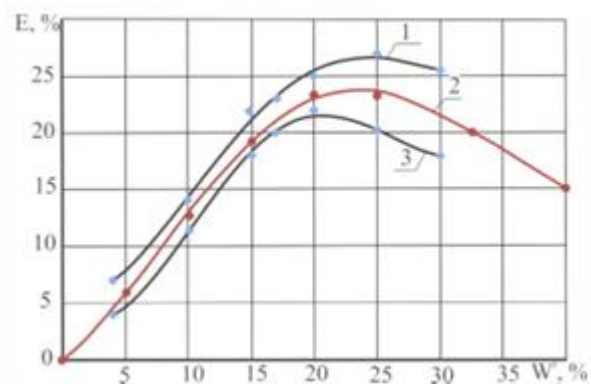


Рисунок 3.12 – Залежність величини економії чистого палива E в емульсіях від їх водовмісту W^p

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.

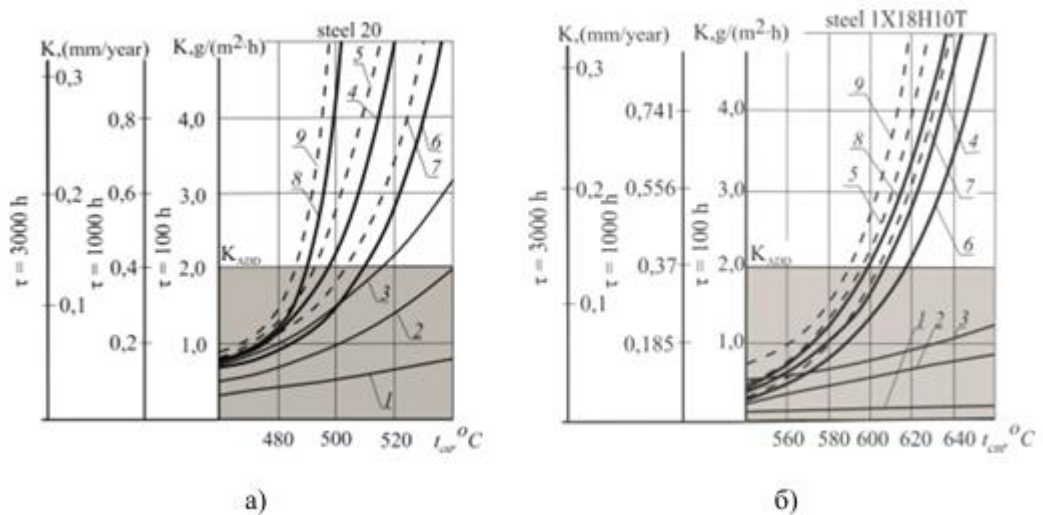


Рисунок 3.13 – Залежності швидкості високотемпературної корозії сталей K при $\tau = 100, 1000, 3000$ годин

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 1Х18Н10Т (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 емульсії у зазначених межах температури стінки $t_{ст}$ швидкість високотемпературної корозії знижується в 1,6 рази для сталі 1Х18Н10Т 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.

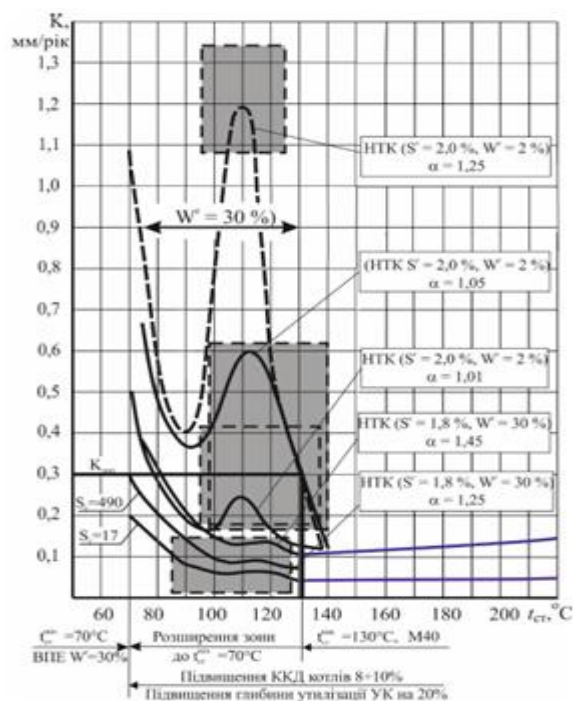


Рисунок 3.14 – Залежності швидкості низькотемпературної корозії К сталі 20 від температури металу $t_{ст}$ (при $\tau = 100$ годин)

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} [11]. Спалювання водомазутних емульсій з водовмістом ~ 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} . [9]

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 сірчаноокислої 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 газоподі 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 кривої [12].

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. [13]

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. [14]

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. [15]

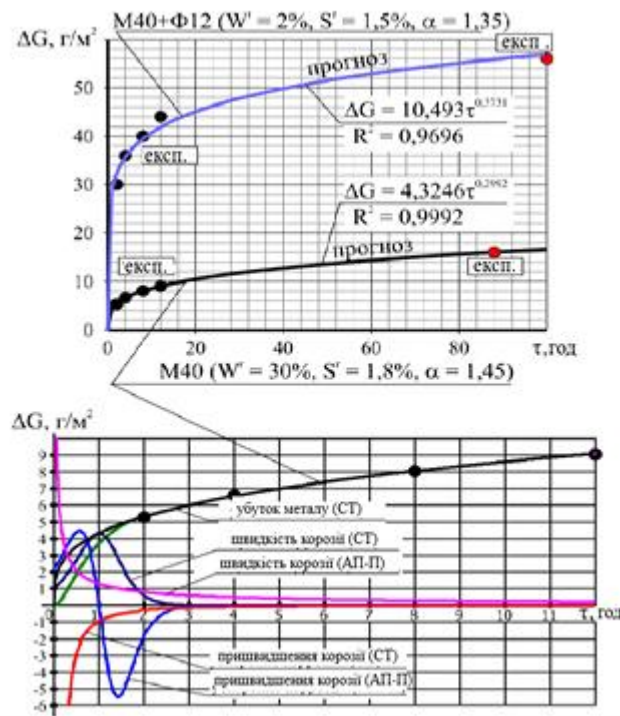


Рисунок 3.15 – Динаміка корозійних процесів: СТ – по степеневій функції; АП-ІІ – по аперіодичній функції 2-го порядку

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. [18] 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. [16]

Методика визначення часу релаксації (перехідного) процесу з обліком даних [12] 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). [17]

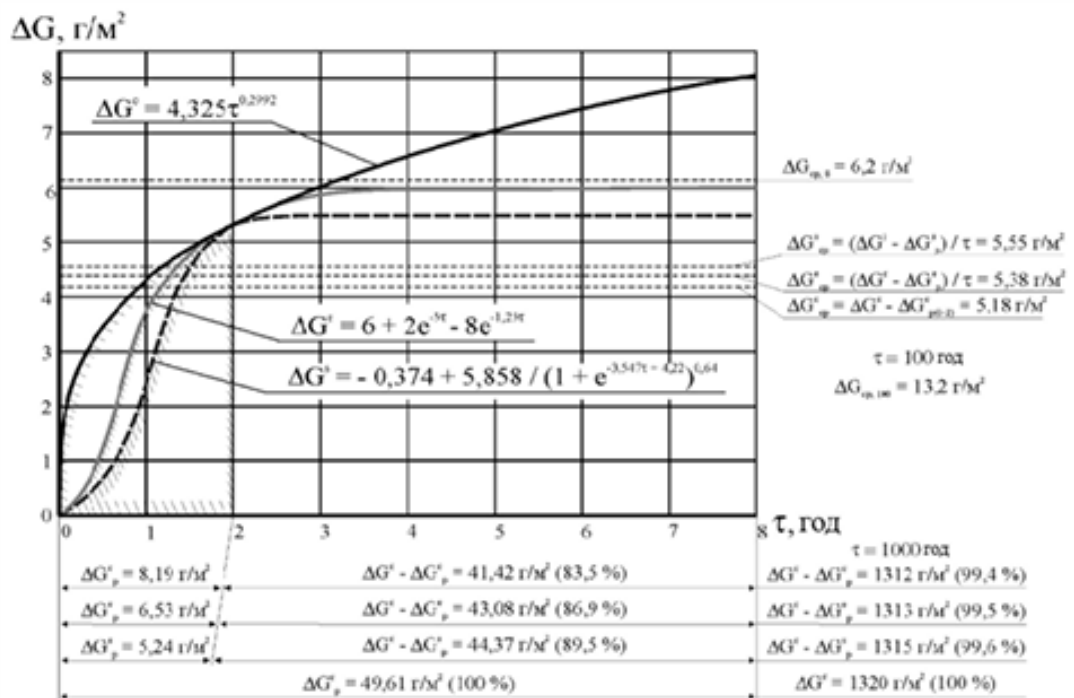


Рисунок 3.16 – Вплив інтенсивності корозії на початковій ділянці (від 0 до 2 год) на результати прогнозу розвитку корозійного процесу

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 убутку 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 %. [19] 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 убутку 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 убутку 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 %. [20] 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. [21] При $\tau > \tau_p$ точність вимірів продовжує зростати, але при більш повільному зростанні значень ΔG . Час, при якому не вдається з достатньою вірогідністю оцінити убуток металу ΔG , вважаємо часом чистого запізнювання τ_2 , яке визначається граничним значенням $\Delta G_{пр} = 5,6 \text{ г/м}^2$, при якому досягається граничне значення погрішності вимірів швидкості корозії 10 % протягом першої години впливу потоку газів. [22]

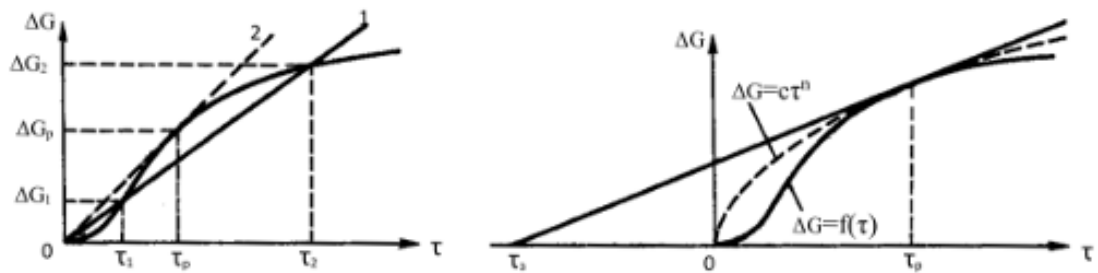


Рисунок 3.17 – Визначення часу релаксації τ_p

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

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

Результуюча інтенсивність розвитку початкової ділянки корозійного процесу визначається сумою часу чистого запізнювання τ_3 і часу релаксації τ_p проходження процесу після закінчення. 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 $\tau_3 + 0,167$. Наведені значення погрішностей оцінки корозії отримані при мінімальній інтенсивності корозійного процесу, що спостерігається при спалюванні ВПЕ із вмістом води 30 %.

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^r на рівні 30 % і солевмістом від 17 до 490 мг/дм³ розроблено відповідні конструктивні схеми промислових (опалювальних) і утилізаційних котлів [23].

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 80...85 $\eta_{пк} = \%$. 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).

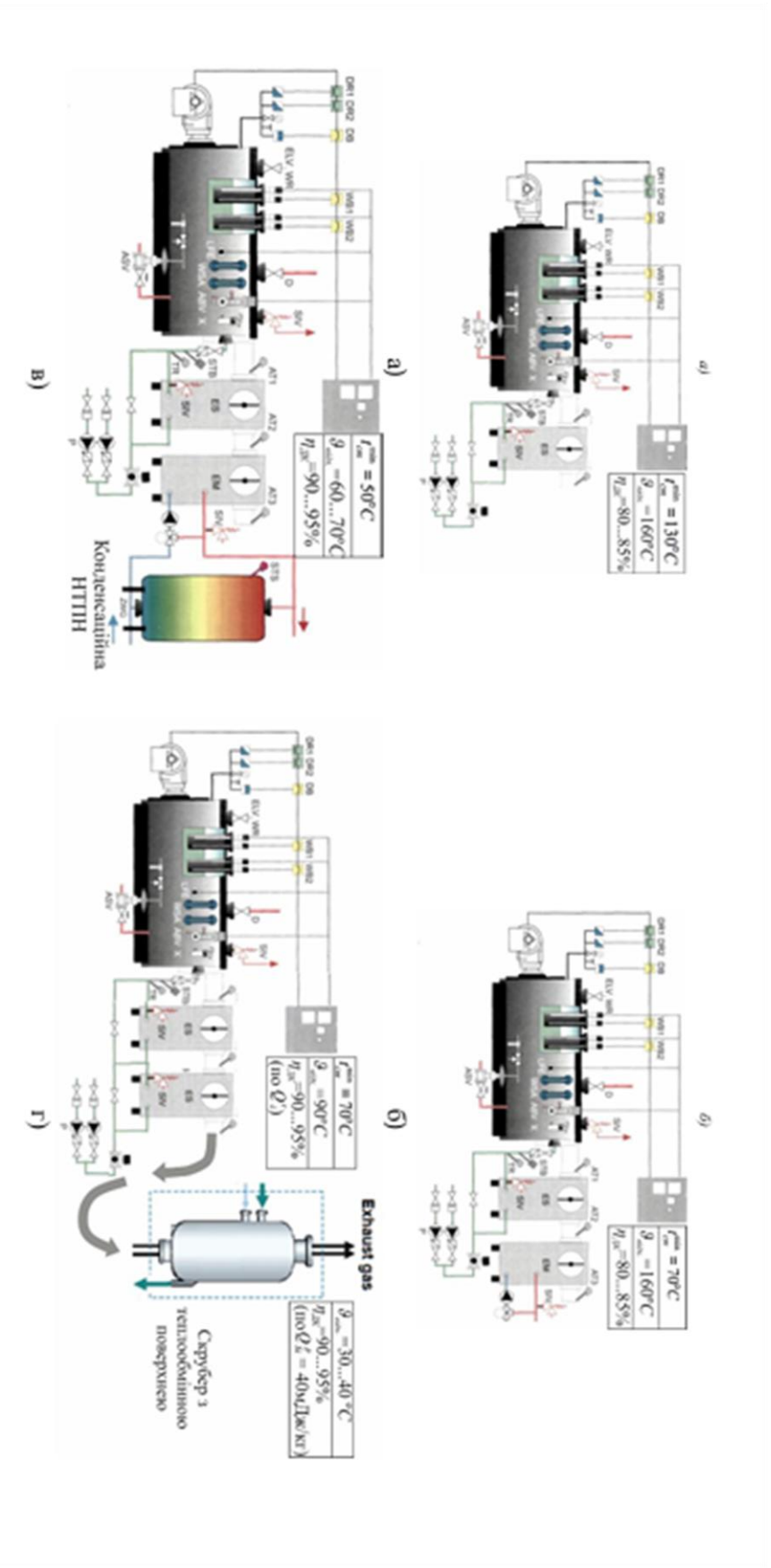


Рисунок 4.1. Варіанти конструктивних схем допоміжних котельних установок:

а) з сухим економайзером, $t_{\text{гр}} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{вих}} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) з сухим економайзером і конденсаційною низькотемпературною поверхнею нагріву [ТТН] для конденсації пари H_2SO_4 , $t_{\text{гр}} = 70\text{...}80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{вих}} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$; в) з сухим економайзером і конденсаційною НТТН для конденсації пари H_2SO_4 , $t_{\text{гр}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{вих}} = 60\text{...}70\text{ }^{\circ}\text{C}$; г) з сухим економайзером і конденсаційною НТТН для конденсації пари H_2SO_4 і скруббером для конденсації водної пари, $t_{\text{вих}} = 30\text{...}40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Але при цьому не спостерігається конденсація водяної пари, концентрація якої в газах значно більша при спалюванні ВПЕ. Для забезпечення процесу конденсації водяної пари при $t_{ст}$ менше 53 °С необхідно використання поверхні нагріву з нержавіючої сталі. Тоді конвективні поверхні котлів будуть складатися із сухої частини (при $t_{ст}$ до 130 °С), конденсаційної частини для конденсації H_2SO_4 (при $t_{ст}$ до 70 °С), а також конденсаційної частини із нержавіючої сталі для конденсації водяної пари (при $t_{ст}$ до 30...50 °С) (рис. 4.1, в). [24]

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) [25].

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...53 °С (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...90 °С.

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.

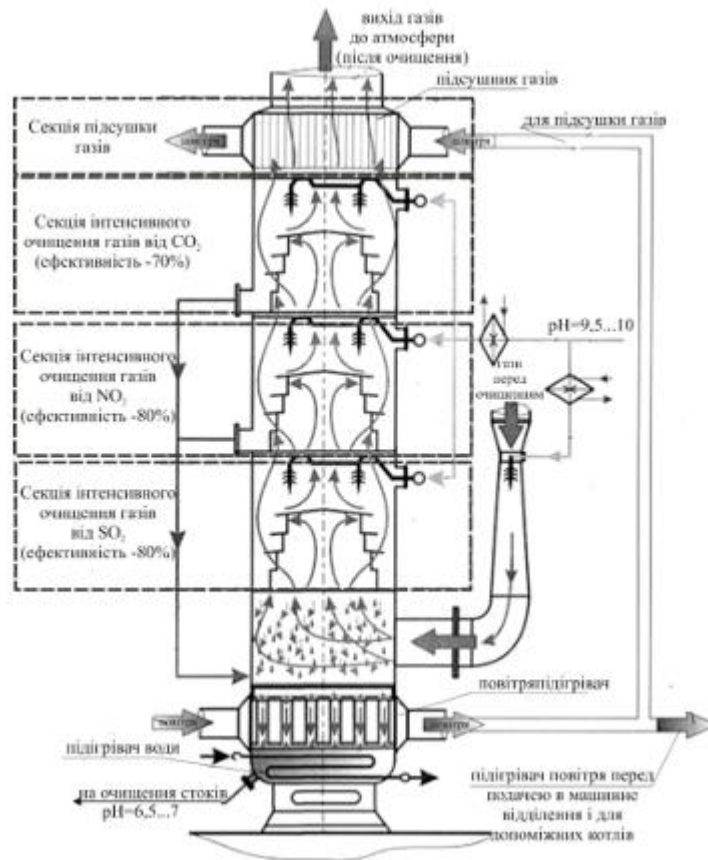


Рисунок 4.2 – Схема трисекційного мокрого скрубера з підігрівом повітря і підсушкою газів гарячим повітрям

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. [26]

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. [27]

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 м³/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 нафтобудовозів)

побудовані залежності витрат палива при спалюванні ВПЕ і економії паливоенергетичних ресурсів B .

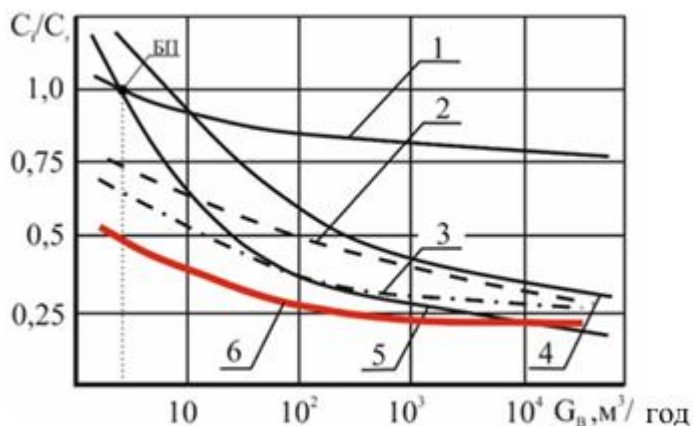


Рисунок 4.3 – Залежність відносної вартості знесоленої води від продуктивності G_B системи водопідготовки (знесолення: 1 – на іонобімінних фільтрах; 2 – в осмотичних модулях та іонобімінних фільтрах; 3 – в електродіалітичних апаратах та іонобімінних фільтрах; 4 – у випаровувачах; 5 – в осмотичних модулях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

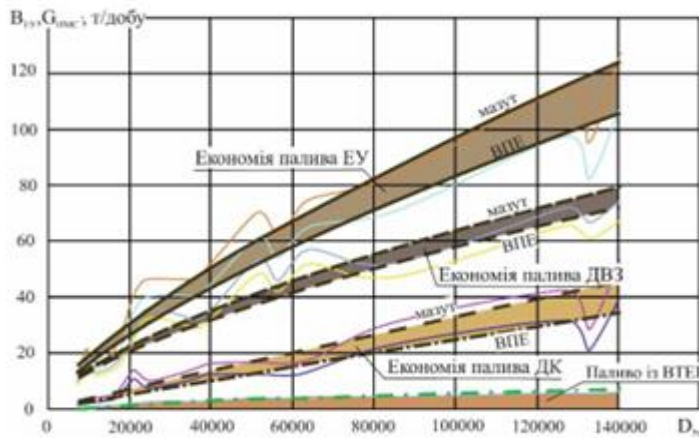
Це – до 8 % економії палива в ДВЗ [14], до 25% – для допоміжних котлів суднових енергоустановок, а також за рахунок використання ВТЕР: нафтозалишків – 0,5 % дедвейту танкерів і 0,4 % витрати палив дизельних двигунів при сепарації (рис. 4.4).

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 зрошуваного 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. [28]

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 електродіалізної обробки води, блок-схема якої представлена на рис. 4.5.



Паливо – ВПЕ на основі мазуту

М40; ДВЗ – ВПЕ (М40 + 20%

H₂O), ДКУ – ВПЕ (М40 + 30%

H₂O)

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

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

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

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

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

$B_{Е\text{ ДК}} = 0,0005x^{0,948}$, $R^2 = 0,9301$;

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

Рисунок 4.4 – Використання паливно-енергетичних ресурсів різними транспортними засобами

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 електродіалізної установки створює у воді більш деформовані пухирці, які забезпечують їхню полірувальну дію (а не кавітаційне руйнування поверхні мембран) [29].

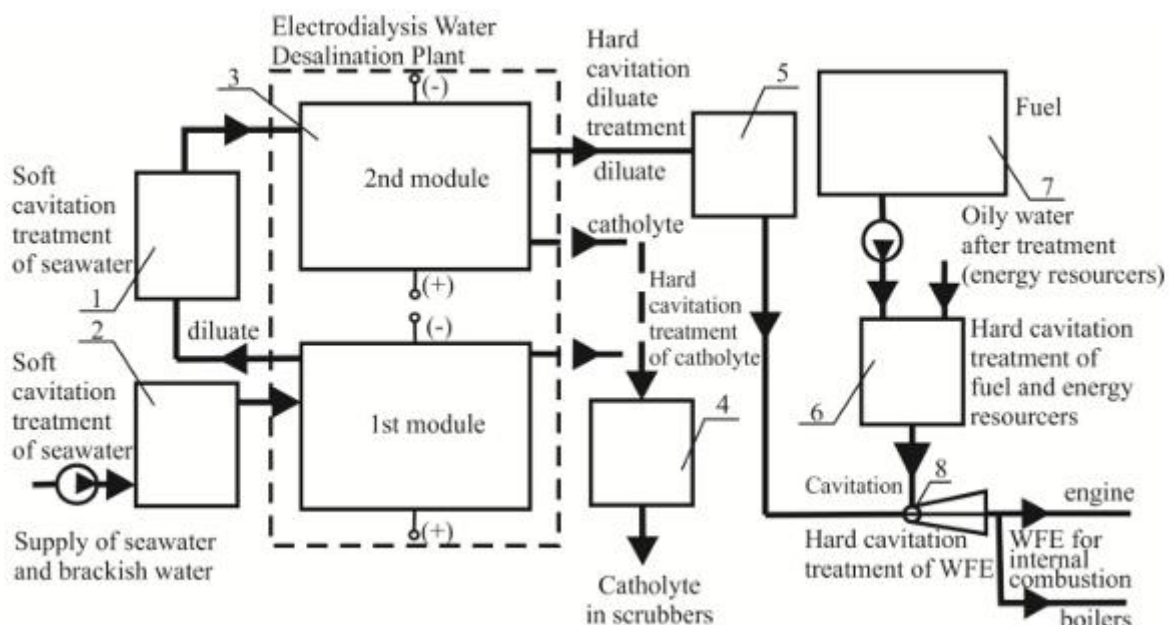


Рисунок 4.5 – Блок-схема технології процесу комплексного використання паливно-енергетичних і водних ресурсів: 1, 2 – блок-схема легкої кавітаційній обробки води, 3 – електродіалізна водоопреснювальна установка, 4, 5, 6 – блок-схема важкої кавітаційній обробки води і палива, 7 – паливна цистерна, 8 –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

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. [42]

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 ресурсозбереженню й зменшенню 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 забезпечення 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.

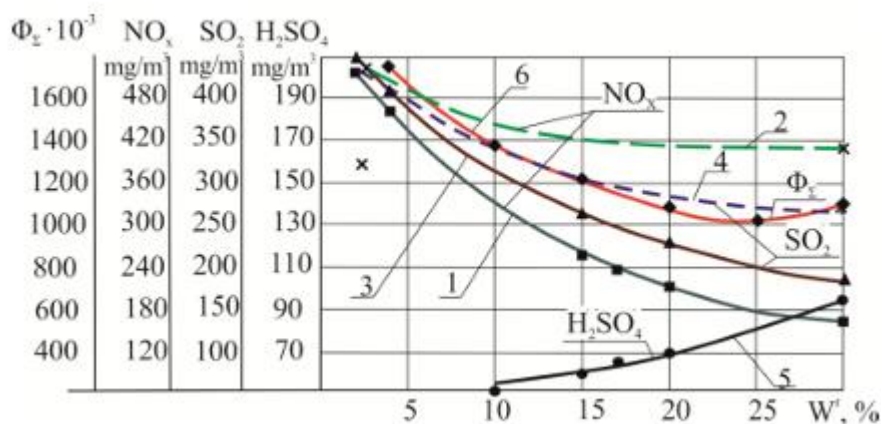


Рисунок 4.6 – Залежність емісії SO_2 , NO_x , H_2SO_4 від водовмісту водопаливної емульсії W^p і способу вприскування води (пари): 1 – водомазутна емульсія, 2 – мазут М40 + водяна пара; 3 – водомазутна емульсія, 4 – мазут М40 + водяна пара; 5 – пара сірчаної кислоти H_2SO_4 ; 6 – сумарна токсичність 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) [16].

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 необводненого 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 [17].

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 згоряння (КЗ). [48]

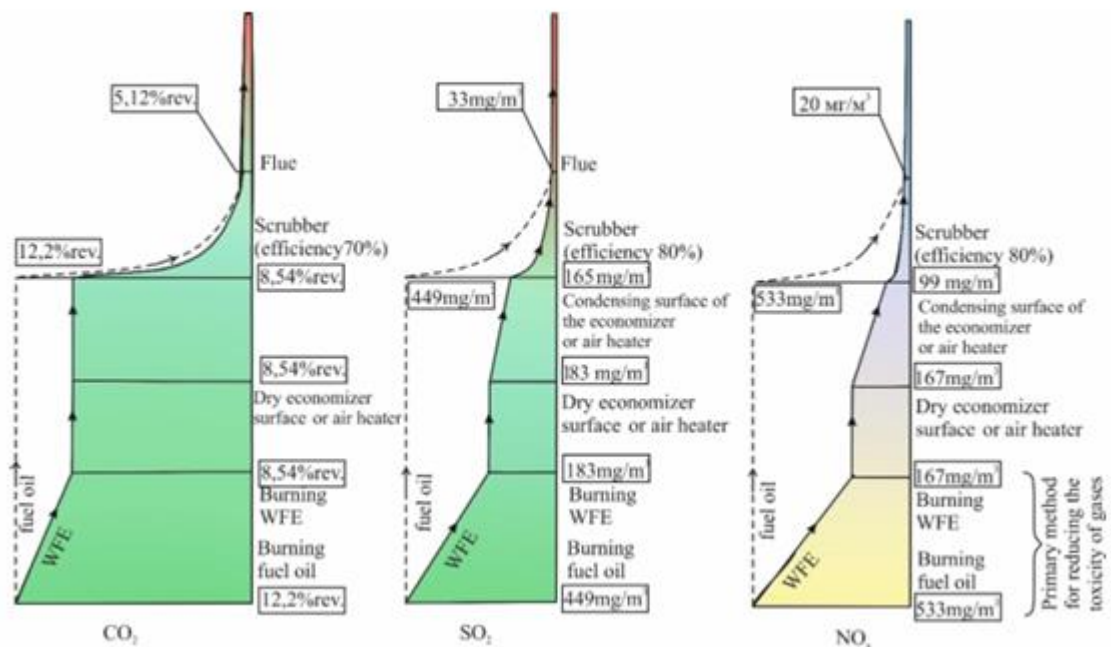


Рисунок 4.7 – Зниження викидів шкідливих речовин при спалюванні водомазутної емульсії із застосуванням скрубберної технології для котлів

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 °C. 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 H_2 , CO , CH_4 , O_2 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 ($\text{H}_2 + \text{CO}$) 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 ($\text{CO} + \text{H}_2$) 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°C , що мало б знижувати концентрацію NO_x .

Мінімальний вплив відновлювальних властивостей ($\text{CO} + \text{H}_2$) 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 $\text{NO}_2:\text{NO} = 0,143$ і є найменшим з розглянутих режимів, що не забезпечує пасивацію поверхонь нагріву з температурою стінки $t_{\text{ст}}$ нижче 130°C . У зв'язку з цим спостерігається зростання низькотемпературної кислотної корозії (НТК) з появою її «піку» на рівні 1,2 мм/рік при $t_{\text{ст}}$ близької до 110°C , що обмежує температуру відхідних газів на рівні $150...160^\circ\text{C}$. [9]

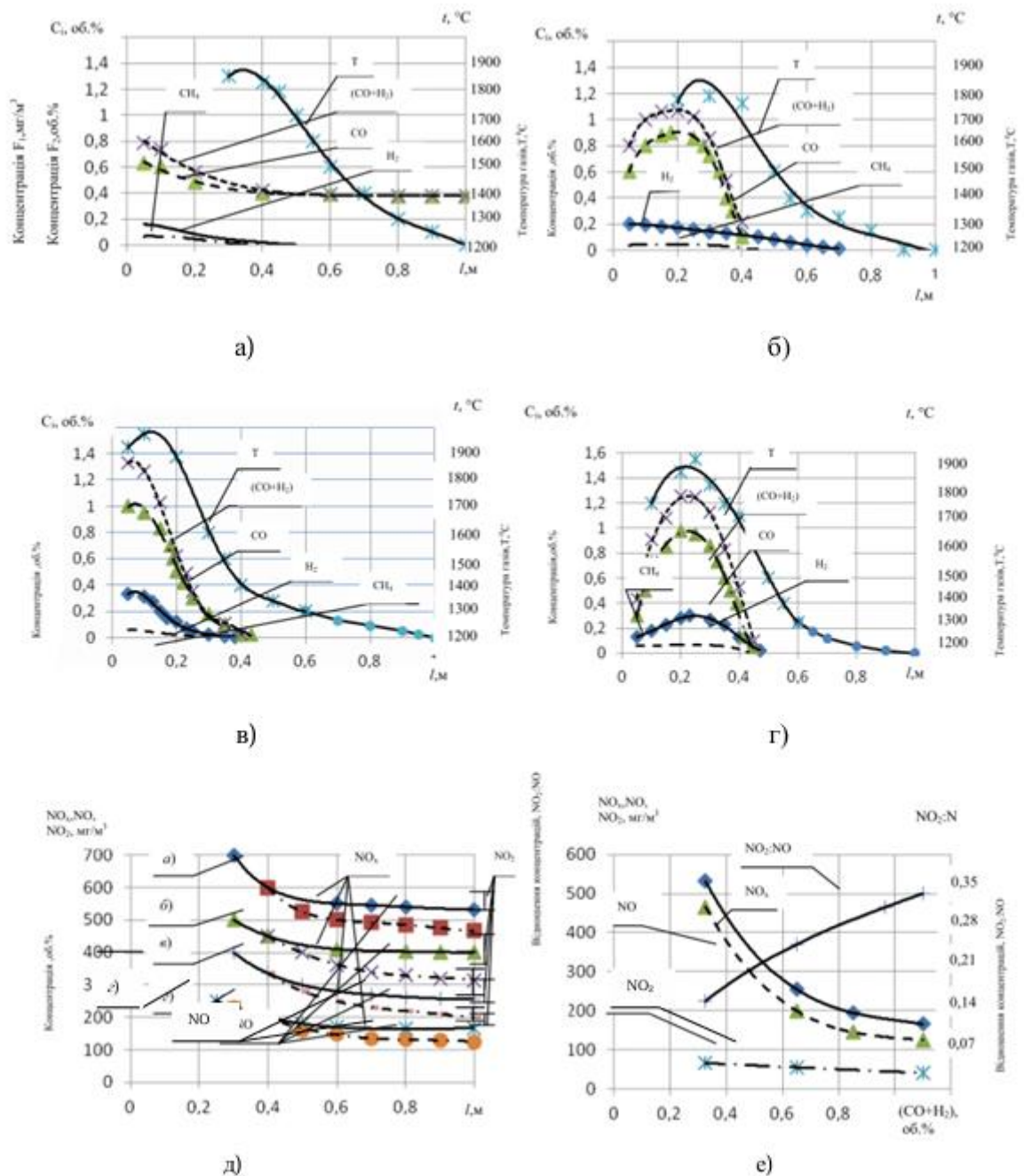


Рисунок 4.8 – Результати експериментальних досліджень якості горіння по концентрації CO, H₂, CH₄, (CO + H₂) і викидів NO_x (NO, NO₂, NO₂:NO) з урахуванням розподілу температур газів t : а) при спалюванні мазуту М40 ($S^p = 1,8 \%$; $W^p = 2,0 \%$); б) при вприскуванні водяної пари на рівні $W^p = 30 \%$; в) при спалювання ВПЕ з $W^p = 15 \%$; г) при спалюванні ВПЕ з $W^p = 30 \%$; д) розподіл концентрацій NO_x, NO, NO₂ по довжині КЗ відповідно режимам а)-г); е) залежність концентрацій NO_x, NO, NO₂ і співвідношення NO₂:NO від концентрацій (CO + H₂)

Тому при спалюванні сірчистих мазутів рівень ККД котлів знаходиться нижче 85 %, а також можна констатувати обмежений рівень глибини

утилізації теплоти вихлопних газів ДВЗ. [10]

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. [11]

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. [12]

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. [13]

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. [14] 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 $1950\text{ }^{\circ}\text{C}$. [15] На цій локальній ділянці відбувається перший етап термічного розкладання NO_x зі швидкістю на рівні 10^7 K/c . 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 $10^5\text{...}10^3\text{ K/c}$. 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 . [16]

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 [17] 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 $t_{\text{ст}}$, що відповідає 60 %-ій концентрації: при $W^p = 17\%$, $t_{\text{ст}} = 112\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при $W^p = 30\%$, $t_{\text{ст}} = 116\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зрушення отриманих залежностей може бути пояснений проходженням реакцій при абсорбції оксидів азоту конденсатом

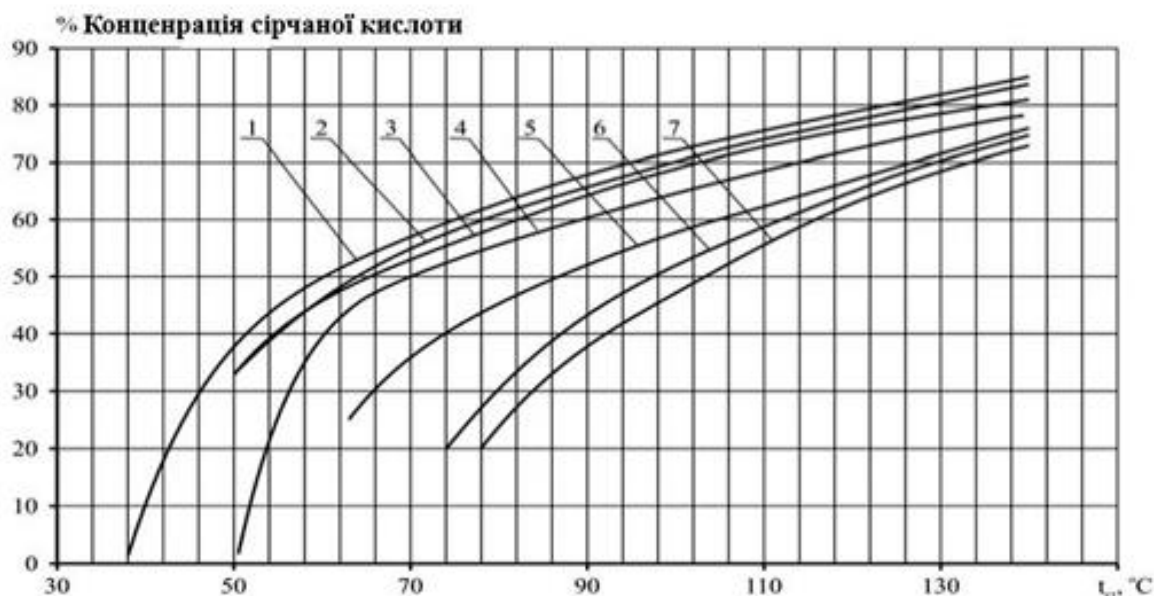
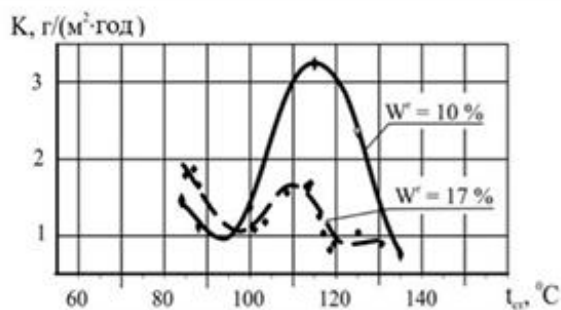


Рисунок 4.9 – Залежність концентрації H_2SO_4 від температури стінки:

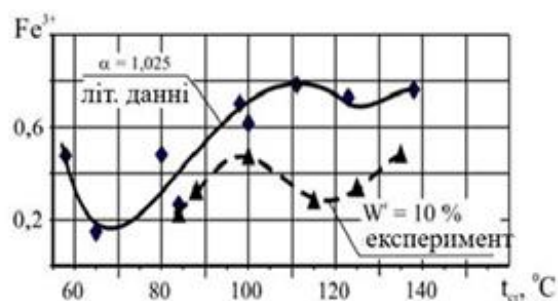
- 1 – лабораторні дослідження (при $p = 0,01$ МПа) [43]; 2 – розрахункові значення з урахуванням наявності інертних газів; 3 – експериментальні значення [3];
 4 – експериментальні значення при температурі газів 170°C [2]; 5 – при спалюванні (М40+Ф12) ($S^p = 1,5\%$; $W^p = 2\%$), $\alpha = 1,35$; 6 – 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.

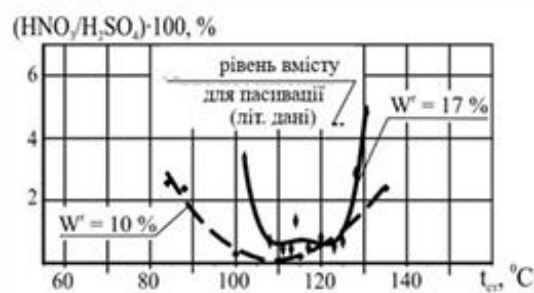
Наявність оксидів азоту в розчині сірчаної кислоти повинне привести до прояву процесу пасивації поверхні металу. В теорії пасивації важлива роль відводиться як адсорбції O_2 , так і утворенню оксидних шарів які становлять захисний шар, що пасивує. Джерелом O_2 , що бере участь в утворенні пасивуючого 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. 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 $\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$. [18]



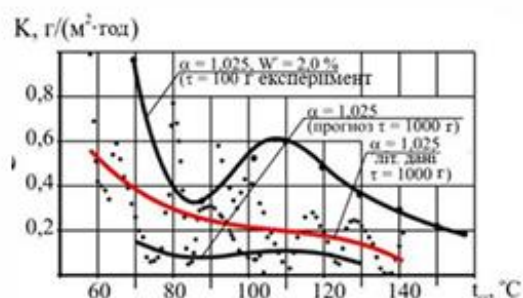
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.10 – Залежність швидкості корозії від температури стінки (а), порівняння відносин $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{заг}}$ (б) і $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ (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. 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. [19]

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 мікрровибхів 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 мікрровибхів 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 [20] 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 клапан 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 [21], 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. [22] 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. [48]

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. [23]

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.

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.

[47]

При спалюванні сірчаного палива з S^p вище 1 % при температурі стінки $t_{ст}$ нижче краплі роси утворюються пари кислоти. 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). [46]

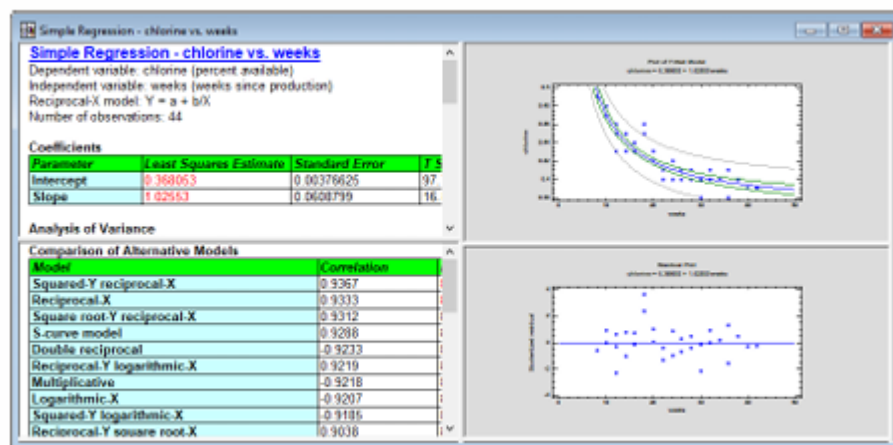


Рисунок 4.11 – Розрахунок залежностей за допомогою системи Statgraphics

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 [24]. 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:

$$1' - W^r = 2\% \cdot \Delta G_s = 211,209 \cdot \ln(S) + 65,827;$$

$$2' - W^r = 17\% \cdot \Delta G_s = 172,903 \cdot \ln(S) + 60,586;$$

$$3' - W^r = 30\% \cdot \Delta G_s = 132,617 \cdot \ln(S) + 36,652.$$

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

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

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

1. У кваліфікаційній роботі на здобуття першого (бакалаврського) рівня вищої освіти 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. [28]

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. [42]

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. [49]

5. Проведений аналіз показав, що процес горіння крапель ВПЕ

супроводжується явищем мікрровибуху 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. Досліджено залежності для прогнозування інтенсивності швидкості високотемпературної та низькотемпературної корозії сталей 20 та 1X18H10T при різному солевмісті та коефіцієнті надлишку повітря.

Дослідження показали, що зі зменшенням солевмісту водомазутної емульсії швидкість високотемпературної корозії знижується, а підвищення солевмісту 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. [43]

Це дозволяє оцінити можливість використання конденсаційних поверхонь нагріву з урахуванням припустимої швидкості корозії. З урахуванням низької швидкості низькотемпературної корозії розроблено конструктивні рішення для промислових та опалювальних котлів за умов спалювання ВПЕ з водовмістом 30 % та солевмістом до 490 мг/дм³. Показано, що застосування скрубєрних технологій дозволить забезпечити майже 100 % утилізацію теплоти конденсації пари сірчаної кислоти і водяної пари при надійній роботі конденсаційних поверхонь котлів. [44]

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. [45]

Підвищення абсорбційних властивостей димових газів і католіта, який

йде на зрошення скруберів, 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 спалювання 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 %.

Результати проведених досліджень можуть бути використані при модернізації котельного обладнання 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.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про енергозбереження» : Закон України від 01.07.1994 № 74/94-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 02.05.2026).
2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 02.05.2026).
3. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» : Закон України від 16.10.1992 № 2707-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 02.05.2026).
4. ДСТУ 3472:2015. Енергозбереження. Терміни та визначення основних понять. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
5. ДСТУ 2296-93. Пожежна безпека. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт України, 1993.
6. ДСТУ EN 303-5:2015. Котли опалювальні. Частина 5. Котли на твердому паливі. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
7. ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. Київ : Мінрегіон України, 2018.
8. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Мінрегіон України, 2013.
9. Жувагіна, І. О., & Флакей, М. Д. (2023, March). Визначення пріоритетів у промисловості України. In *The 3 rd International scientific and practical conference “Innovations and prospects in modern science”* (March 13-15, 2023) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2023. 350 p. (p. 331).
10. Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж. Київ: Мінпаливенерго України, 2007.
11. Жуковський С. С., Мисак Й. С. *Котельні установки і теплові мережі*. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2009. 476 с.
12. Zhuvahina, I. (2026, April). Strategic transformation of the Ukrainian

peat industry: from state-owned stagnation to private-sector modernization. In *Імперативи економічного зростання в контексті реалізації Глобальних цілей сталого розвитку*. Київський національний університет технологій та дизайну.

13. Iryna, Z. STRATEGIC TRANSFORMATION OF THE UKRAINIAN PEAT INDUSTRY: FROM STATE-OWNED STAGNATION TO PRIVATE-SECTOR MODERNIZATION. *технологій та дизайну*, 2026.

14. Chorna, M., Buhrimenko, R., Smirnova, P., Shynkar, S., & Zhuvakina, I. (2019). USE OF CONSOLIDATION STRATEGIES IN ORDER TO IMPROVE THE CORPORATE SECURITY: METHODOLOGICAL ASPECT. *Journal of Security & Sustainability Issues*, 8(4), 783.

15. Жувагіна, І. О., & Замарайкіна, Т. С. (2022). Потенціал торговельного підприємства: загальнонаукові підходи до формування та реалізації.

16. Iermakova, O., Zhuvahina, I., Metelytsia, V., & Dmytryshyn, R. (2024, December). Conceptual principles of ecologically safe development of aquaculture. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1429, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.

17. Taranenko, I., Chychun, V., Korolenko, O., Goncharenko, I., & Zhuvahina, I. (2021). Management of the Process of E-Commerce Development in Business on the Example of the European Union. *Studies of Applied Economics*, 39(5).

18. Chorna, M., Bezghinova, L., Dorokhov, O., Zhuvahina, I., & Volosov, A. (2021). Efficiency of Retail Enterprises in Context of Achievement of Competitive Advantages: Ukrainian Realities. *TEM Journal*, 10(3), 1072.

19. Murashko, O., Havrylyuk, R., Zhuvahina, I., Chornovol, A., & Andriyenko, M. (2021). Economic and legal aspects of EU insurance market development.

20. Жувагіна, І. О., & Химорода, І. І. (2022, October). Стратегічні імперативи забезпечення стійкого функціонування промислових підприємств

як основи розвитку національної економіки. In *The 10 th International scientific and practical conference “Eurasian scientific discussions”* (October 23-25, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2022. 474 p. (p. 405).

21. Жувагіна, І. О. (2021). Суднобудування—стартове виробництво морської індустрії.

22. Kovshun, N., Solodkyy, V., Zhuvahina, I., Malanchuk, L., Banar, O., & Krysak, A. (2025, December). Substantiation of Business Projects for the Transition of Regional Heat and Power Industry to the Use of Local Fuels: Energy, Economic and Environmental Aspects. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1576, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.

23. Iryna, Z. (2022, June). WAR IN UKRAINE AND ITS ECONOMIC CONSEQUENCES. In *The 12 th International scientific and practical conference “International scientific innovations in human life”* (June 8-10, 2022) Cognum Publishing House, Manchester, United Kingdom. 2022. 991 p. (p. 843).

24. Жувагіна, І. О. (2024). ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В БІЗНЕСІ: СУЧАСНІ ТРЕНДИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕГРУВАННЯ. *Матеріали публікуються за оригіналами, наданими авторами. Претензії до організаторів не приймаються. Головний редактор д. т. н., проф. Петренко ВО Науковий редактор д. т. н., проф. Молоканова ВМ Науковий редактор к. т. н., доц. Дорожко ГК, 342.*

25. Zhuvahina, I., Naumenko, V., & Naumenko, M. (2017). THE STATE OF DIGITALIZATION OF UKRAINE'S ECONOMY ON THE PATH TO EUROPEAN INTEGRATION.

26. Халатов А. А., Авраменко А. А. *Тепломасообмін та гідродинаміка в енергетичних установках*. Київ : Наукова думка, 2013. 500 с.

27. Бабак В. П. *Теплоенергетичні установки та системи*. Київ : Техніка, 2010. 320 с.

28. Жувагіна, І. О. (2021). Тенденції інноваційного розвитку соціально-орієнтованої економіки країни.

29. Turns S. R. *An Introduction to Combustion: Concepts and*

Applications. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2012. 742 p.

30. Glassman I., Yetter R. A., Glumac N. *Combustion*. 5th ed. Academic Press, 2014. 800 p.

31. Basu P. *Boilers and Burners: Design and Theory*. New York : Springer, 2020. 350 p.

32. Ithnin A.M., Ahmad M.A., Bakar M.A.A. Recent progress on water-in-diesel emulsion fuels: combustion, performance and emissions // *Applied Energy*. – 2022. – Vol. 310. – 118512.

33. Ghojel J.I. Review of advances in water-emulsified fuels and their applications in combustion systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 135. – 110222.

34. Alahmer A., Yamin J., Sakhrieh A. Engine performance and emission characteristics using water-emulsified fuels: recent trends // *Energy Conversion and Management*. – 2023. – Vol. 276. – 116543.

35. Park S.H., Kim H.J. Effects of water content in emulsified fuels on combustion and emission reduction // *Fuel*. – 2022. – Vol. 324. – 124678.

36. Li Y., Zhang Z., Wang Q. Experimental study on combustion characteristics of water-in-fuel emulsions in industrial boilers // *Energy*. – 2024. – Vol. 286. – 129567.

37. Chen J., Liu H., Wang S. Influence of emulsified fuel properties on spray and combustion behavior // *Fuel Processing Technology*. – 2021. – Vol. 213. – 106678.

38. Singh D., Kumar S. Emission reduction using water-emulsified fuels in thermal systems // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 345. – 131098.

39. Zhao X., Huang Z. Combustion and emission characteristics of emulsified fuels: a review // *Energy Reports*. – 2023. – Vol. 9. – P. 1450–1465.

40. Basu P. *Advanced Boilers and Heat Recovery Systems*. – Springer, 2021. – 410 p.

41. Turns S.R. *Combustion: Concepts and Applications*. – 4th ed. – McGraw-Hill, 2022.

42. Жувагіна, І. О., & Колісніченко, А. О. (2018). Механізм управління розвитком та ефективним використанням трудового потенціалу підприємства.
43. Glassman I., Yetter R.A. Combustion Physics (updated edition). – Academic Press, 2023.
44. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions. – CRC Press, 2021.
45. Долінський А.А., Басок Б.І. Сучасні технології підвищення ефективності теплоенергетичних установок // *Промислова теплотехніка*. – 2022. – №3. – С. 5–12.
46. Коваленко Г.В. Аналіз застосування водопаливних емульсій у котельних агрегатах // *Теплоенергетика*. – 2023. – №2. – С. 28–34.
47. Мельник В.М. Корозійна стійкість матеріалів при спалюванні емульсійних палив // *Проблеми загальної енергетики*. – 2024. – №1. – С. 41–47.
48. Жувагіна, І. О., & Флакей, М. Д. (2023, March). Визначення пріоритетів у промисловості України. In *The 3 rd International scientific and practical conference “Innovations and prospects in modern science” (March 13-15, 2023) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2023. 350 p.* (p. 331).
49. Пилипенко О.В. Вплив водної фази на характеристики горіння паливних емульсій // *Енергетика та довкілля*. – 2022. – №4. – С. 19–25.
50. Жуковський С.С. Котельні установки: сучасні підходи до модернізації // *Вісник енергетики України*. – 2021. – №5. – С. 12–18.