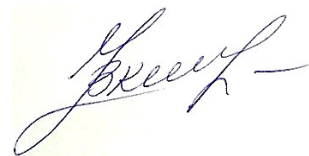


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КОРНІЄНКО ВІКТОРІЯ СЕРГІІВНА



УДК 621.181.27

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ
КОНТУРІВ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ПРИ ВИКОРИСТАННІ
ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ**

Спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі технічної теплофізики та суднових паровиробних установок у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерство освіти і науки України

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
Андрєєв Андрій Адольфович,
завідувач кафедри суднового
машинобудування та енергетики
Херсонської філії Національного
університету кораблебудування
імені адмірала Макарова МОН України

Офіційні опоненти – член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор
Басок Борис Іванович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
завідувач відділу теплофізичних основ
енергоощадних технологій

доктор технічних наук, професор
Ткаченко Станіслав Йосипович,
завідувач кафедри теплоенергетики
Вінницького національного технічного
університету МОН України

Захист дисертації відбудеться «19» листопада 2018 р. о 11⁰⁰ годині в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.088.03 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна. Автореферат розіслано «16» жовтня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д41.088.03,
доктор технічних наук, професор



В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. В когенераційних енергетичних установках (КЕУ), в яких немає можливості спалювати газоподібне паливо, використовують рідкі сірчисті палива, включно з важкими їх сортами, зокрема при застосуванні в якості дизель-генераторів сучасних суднових середньообертових двигунів, які можуть працювати і на мазуті. Такі дизель-генератори відзначаються низькими питомими витратами палива, а їх ефективний ККД досягає 45 %. При цьому втрати теплоти з відхідними газами на рівні 25...27 %, наддувним повітрям – 15...17 %, охолоджуючою двигуни водою – близько 5 %, з маслом – 2 %.

При температурному напорі $\Delta t = 30$ °С температура газів на виході з УК становить приблизно 160 °С, що пов'язано зі зростанням інтенсивності низькотемпературної корозії (НТК) до 1,2 мм/рік при температурах стінки вище 130 °С. При цьому одночасно зростає інтенсивність забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву (НТПН), внаслідок чого знижується інтенсивність теплопередачі в поверхнях нагріву, зростає аеродинамічний опір УК.

Ефективність використання теплоти спалювання палива може бути підвищена шляхом глибокого охолодження продуктів згоряння нижче температури точки роси, що є практично єдиною можливістю зниження температури відхідних газів утилізаційного котла (УК) при одночасному забезпеченні надійності роботи, екологічності та економічності КЕУ.

Накопичений досвід використання водопаливних емульсій (ВПЕ) в котлах та двигунах вказує на безперечні переваги цього виду палива: знижується ефективна питома витрата палива приблизно на 8 %, у відпрацьованих газах суттєво зменшується концентрація оксидів азоту в 1,4...3,1 рази, концентрація СО – в 1,3...1,5 рази, знижується димність в 1,3...2,4 рази.

Опубліковані кількісні залежності швидкості НТК від температури стінки $t_{ст}$ при використанні ВПЕ з водовмістом W^r до 30 % при значеннях коефіцієнта надлишку повітря α до 1,5 і вмісту сірки S^r до 1,8 % вказують на відсутність корозійного піку при $t_{ст} = 110$ °С і можливість зниження температури стінки $t_{ст}$ до 70 °С при допустимій швидкості НТК на рівні 0,25 мм/рік. У цьому випадку з'являється можливість встановити конденсаційні поверхні нагріву на виході газів з УК і збільшити глибину утилізації. Однак кількісні дані щодо швидкості НТК при значеннях коефіцієнта надлишку повітря в діапазоні $\alpha = 1,5...3,0$, в якому саме і експлуатується УК, практично відсутні.

В нормативних документах розрахунку конвективних поверхонь нагріву відсутні також дані щодо визначення коефіцієнта забруднення ε_z для сухих і конденсаційних поверхонь нагріву при використанні ВПЕ.

Спалювання додаткового палива у вигляді ВПЕ в газоході перед УК забезпечує: 1) збільшення енергії відхідних газів після двигуна КЕУ; 2) збільшення температурного напору Δt в УК; 3) економію вихідного палива за рахунок використання теплоти допалювання горючих компонентів відхідних газів (коксових і сажових часток, вуглеводнів, СО, бензапірена); 4) підвищення параметрів пари в УК, що дає можливість збільшити ККД КЕУ з паровою турбіною, а отже зменшити

витрати палива на КЕУ. Для підвищення ефективності теплоутилізаційних контурів (ТУК) і характеристик УК в якості палива, що додатково допалюється перед УК, доцільно дослідити використання ВПЕ з водовмістом до 30 %, що дає можливість підвищити параметри пари, що виробляється в УК, і скоротити витрати вихідного палива в КЕУ.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена тим, що аспекти вирішення проблеми корозії і забруднення НТПН при використанні сірчистих ВПЕ з надлишками повітря α більше 1,5, а також визначення термічного опору шару забруднень при використанні різних палив і ВПЕ розроблені недостатньо.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки України "Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі" (напрямок 6), зокрема у рамках науково-дослідної теми №0111U002309 "Теоретичні основи підвищення стійкості процесів горіння вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згорання газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних стабілізаторів", а також плану НДР обласної програми з енергозбереження, затвердженої на сесії Херсонської обласної Ради №320 від 12.12.2000 р. У цих роботах здобувач приймала участь як виконавець на посаді молодшого наукового співробітника.

Мета наукового дослідження - підвищення техніко-економічної ефективності роботи утилізаційних котлів і теплоутилізаційних контурів когенераційних установок за рахунок інтенсифікації теплообміну та зменшення швидкості процесів низькотемпературної корозії і забруднення поверхонь нагріву, зниження емісії шкідливих речовин в атмосферу при використанні водопаливних емульсій.

Основні задачі наукового дослідження:

- експериментальні дослідження процесів корозії і забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву утилізаційних котлів при коефіцієнтах надлишку повітря $\alpha = 1,5 \dots 3,0$, що визначають інтенсивність теплообміну, глибину утилізації теплоти відхідних газів і надійність експлуатації теплоутилізаційних контурів когенераційних установок;
- дослідження впливу коефіцієнта надлишку повітря α , водовмісту емульсії W^r і вмісту сірки в паливі S^r на інтенсивність низькотемпературної корозії і забруднення;
- теоретичне обґрунтування прогнозування низькотемпературної корозії і забруднення на основі статистичних даних і результатів експериментальних досліджень при коефіцієнтах надлишку повітря $\alpha = 1,5 \dots 3,0$;
- визначення мінімального значення температури стінки $t_{\text{ст}}^{\text{min}}$, при якому забезпечується допустима швидкість низькотемпературної корозії на рівні 0,25 мм/рік і мінімальне значення температури відхідних газів $\vartheta_{\text{від}}^r$ на виході з утилізаційного котла;
- визначення необхідної періодичності очищення поверхонь нагріву утилізаційних котлів;
- визначення екологічних і економічних показників розроблених

теплоутилізаційних контурів когенераційних установок.

Об'єктом дослідження є теплоутилізаційний контур когенераційної установки при використанні водопаливних емульсій.

Предмет дослідження – процеси теплообміну, фізико-хімічні процеси корозії і забруднення при використанні водопаливних емульсій в когенераційній установці.

Методи дослідження - експериментально-теоретичні: експериментальні дослідження процесів осадження твердих зольних і коксових часток з потоку відхідних газів на низькотемпературні поверхні нагріву котлів, корозії металу і забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву при температурах стінки $t_{ст}$ нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти; теоретичне обґрунтування впливу коефіцієнта надлишку повітря α і температури стінки $t_{ст}$ на величину швидкості корозії і забруднення; методи математичного планування експерименту; методи регресійного аналізу результатів досліджень корозії і забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву; аналіз схемно-конструктивних рішень виконувався з використанням програмних комплексів ЕОМ.

Теплотехнічні вимірювання параметрів проводилися стандартними методами; при постановці дослідів використано загальну теорію моделювання і планування експериментів, а при обробці даних і перевірці гіпотез – статистичний аналіз.

Наукові результати, які автор захищає, та їх **новизна**:

Вперше:

- отримані напівемпіричні залежності питомої втрати маси металу від водовмісту водопаливної емульсії $\Delta G_k = f(W^r)$, вмісту сірки у вихідному паливі $\Delta G_k = f(S^r)$ і коефіцієнта надлишку повітря $\Delta G_k = f(\alpha)$ при температурах стінки $t_{ст}$ нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти $t_{pH_2SO_4}$, які характеризують інтенсивність низькотемпературної корозії конденсаційних поверхонь нагріву на різних режимах роботи утилізаційних котлів;

- отримані напівемпіричні залежності питомої маси забруднення від водовмісту емульсії $\Delta G_3 = f(W^r)$, вмісту сірки у вихідному паливі $\Delta G_3 = f(S^r)$ і коефіцієнта надлишку повітря $\Delta G_3 = f(\alpha)$ при температурах стінки $t_{ст}$ нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти $t_{pH_2SO_4}$, що дозволяють визначати аеродинамічний опір конденсаційних поверхонь нагріву і періодичність їх очищення;

- розроблена тривимірна модель і отримане рівняння регресії, які описують інтенсивність корозії $\Delta G_k = f(W^r; S^r; \alpha)$ низькотемпературних поверхонь нагріву, що дають можливість розраховувати мінімальне значення температури стінки як умови надійної експлуатації конденсаційних поверхонь нагріву;

- розроблена тривимірна модель і отримане рівняння регресії, які описують інтенсивність забруднення $\Delta G_3 = f(W^r; S^r; \alpha)$ низькотемпературних поверхонь нагріву і дають змогу обчислювати коефіцієнт забруднення конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів;

- отримані залежності коефіцієнтів забруднення ε_3 для конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву від швидкості газів w_r , водовмісту водопаливної емульсії W^r , і температури стінки $t_{ст}$, що дозволяють визначити періодичність очищення сухих і конденсаційних поверхонь нагріву, які

забезпечують оптимальні теплотехнічні показники утилізаційних котлів;

- розроблена тривимірна модель і отримане рівняння регресії, які описують коефіцієнт забруднення $\varepsilon_3 = f(t_{\text{ст}}, W^r, w_r)$ і дають можливість розраховувати інтенсивність теплообміну в сухих і конденсаційних поверхнях нагріву утилізаційних котлів при їх проектуванні.

Достовірність результатів досліджень забезпечена коректною постановкою науково-прикладного завдання, застосуванням фізично і математично обґрунтованих методів вирішення поставлених завдань досліджень, задовільним узгодженням отриманих результатів досліджень на експериментальній установці з даними випробувань на діючих котлах при практично однакових умовах горіння; результатами порівняльного аналізу запропонованих технічних рішень.

Практичну цінність становлять результати дослідження:

- рекомендації з визначення інтенсивності низькотемпературної корозії і забруднення та періодичності очищення сухих і конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву в залежності від складу палива і режимів його спалювання, що забезпечують надійну експлуатацію поверхонь нагріву;

- методика розрахунку коефіцієнтів забруднення ε_3 сухих і конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів в залежності від швидкості газів w_r , коефіцієнта надлишку повітря α , вмісту сірки в паливі S^r , водовмісту водопаливної емульсії W^r і температури стінки $t_{\text{ст}}$, що дозволяє проводити конструктивні розрахунки конвективних поверхонь нагріву;

- рекомендації з визначення коефіцієнтів забруднення ε_3 для сухих і конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву в залежності від швидкості газів, коефіцієнта надлишку повітря α , вмісту сірки в паливі S^r , водовмісту водопаливної емульсії W^r і температури стінки $t_{\text{ст}}$ при проектуванні конвективних поверхонь нагріву утилізаційних котлів;

- визначений діапазон температури стінки $t_{\text{ст}}$ за безпечної експлуатації конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву, що відкриває можливості для глибокої утилізації;

- отримані дані щодо періодичності очищення конвективних низькотемпературних поверхонь нагріву при використанні водопаливних емульсій, які підтверджують її збільшення в 2...3 рази і відповідне скорочення експлуатаційних витрат порівняно з експлуатацією на природних паливах.

Впровадження розроблених рекомендацій у практику проектування дозволяє поліпшити характеристики утилізаційних котлів і теплоутилізаційних контурів когенераційних установок, одержувати більш достовірні їх значення в залежності від складу палива і режимів роботи когенераційної установки.

Впровадження результатів досліджень. Результати дисертаційної роботи у вигляді методики розрахунку характеристик тепломасообмінних процесів в УК, теплоутилізаційних контурів КЕУ, рекомендацій з експлуатації КЕУ при спалюванні ВПЕ використовуються в організаціях: ТОВ "ГК Теплотехніка", ТОВ "Хладотехніка", ТОВ "Смарт-Мерітайм Груп" (м. Херсон). Розроблена математична модель визначення інтенсивності корозії і забруднення НТПН, розрахунків значень коефіцієнтів забруднення ε_3 , коефіцієнтів теплопередачі

використовуються в навчальному процесі Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при виконанні дипломних проектів і магістерських робіт зі спеціальності "Теплоенергетика".

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, висновки і рекомендації, що представлені в дисертації та виносяться на захист, отримані автором самостійно та опубліковані в 7 наукових працях. В 16 роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачем розроблені математичні моделі процесів визначення коефіцієнтів пористості забруднення, еквівалентної теплопровідності пористого шару забруднень на конденсаційних поверхнях нагріву УК, проведено аналіз результатів експериментальних досліджень та обґрунтування достовірності одержаних результатів наукових досліджень.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційних досліджень доповідалися й були позитивно оцінені на V, VI і VIII Міжнародних техн. конф. "Суднова енергетика: стан і проблеми" (Миколаїв, НУК, 2011 р., 2013 р., 2017 р.); на IV Міжнародній техн. конф. "Муніципальна енергетика: проблеми, рішення" (Миколаїв, НУК, 2011 р.); на Всеукраїнському форумі молодих учених, присвяченому Дню науки "Макаровські читання" (Миколаїв, НУК, 2012 р., 2013 р.); на IV і VI Міжнародних техн. конф. "Інновації в суднобудуванні й океанотехніці" (Миколаїв, НУК, 2013 р., 2015 р.); MINT (Херсон, ХДМА, 2010 р., 2017 р.), Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів "Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика" (Маріуполь, ДВНЗ "ПДТУ", 2017).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 23 наукових праць, з них 6 наукових статей у спеціалізованих наукових виданнях по технічним наукам, що входять у перелік, затверджений ДАК МОН України, 6 з яких опубліковано в виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз, 2 патенти України на винахід і 15 тез міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, 6 розділів, висновків, 2 додатків та списку використаних джерел. Обсяг дисертаційної роботи становить 160 сторінок, рисунків – 81. Список використаних джерел містить 152 найменувань на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи і сформульовані мета і завдання дослідження, відображена наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** виконаний аналіз наукових уявлень про вплив фізико-хімічних процесів на техніко-економічні та екологічні показники роботи котлів. На підставі виконаного аналізу встановлено, що відсутні кількісні дані зі швидкості корозії і забруднення НТПН при використанні ВПЕ з надлишком повітря α вище 1,5 (до 3,0), що впливає на ефективність теплопередачі, на теплотехнічні і економічні характеристики КЕУ.

На підставі проведеного в першому розділі аналізу сформульовані мета і задачі дослідження.

У **другому розділі** представлено обґрунтування прийнятих методів і методик досліджень і вимірювань.

Послідовність представлених аналітичних і експериментальних досліджень теплохімічних процесів в газах і на низькотемпературних поверхнях нагріву УК, дослідження теплопередачі від газів до НТПН при температурах стінки $t_{ст}$ вище і нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти $t_{pH_2SO_4}$, а також визначення впливу різних чинників на економічні показники роботи УК у складі КЕУ і самої КЕУ, представлена на рис. 1.

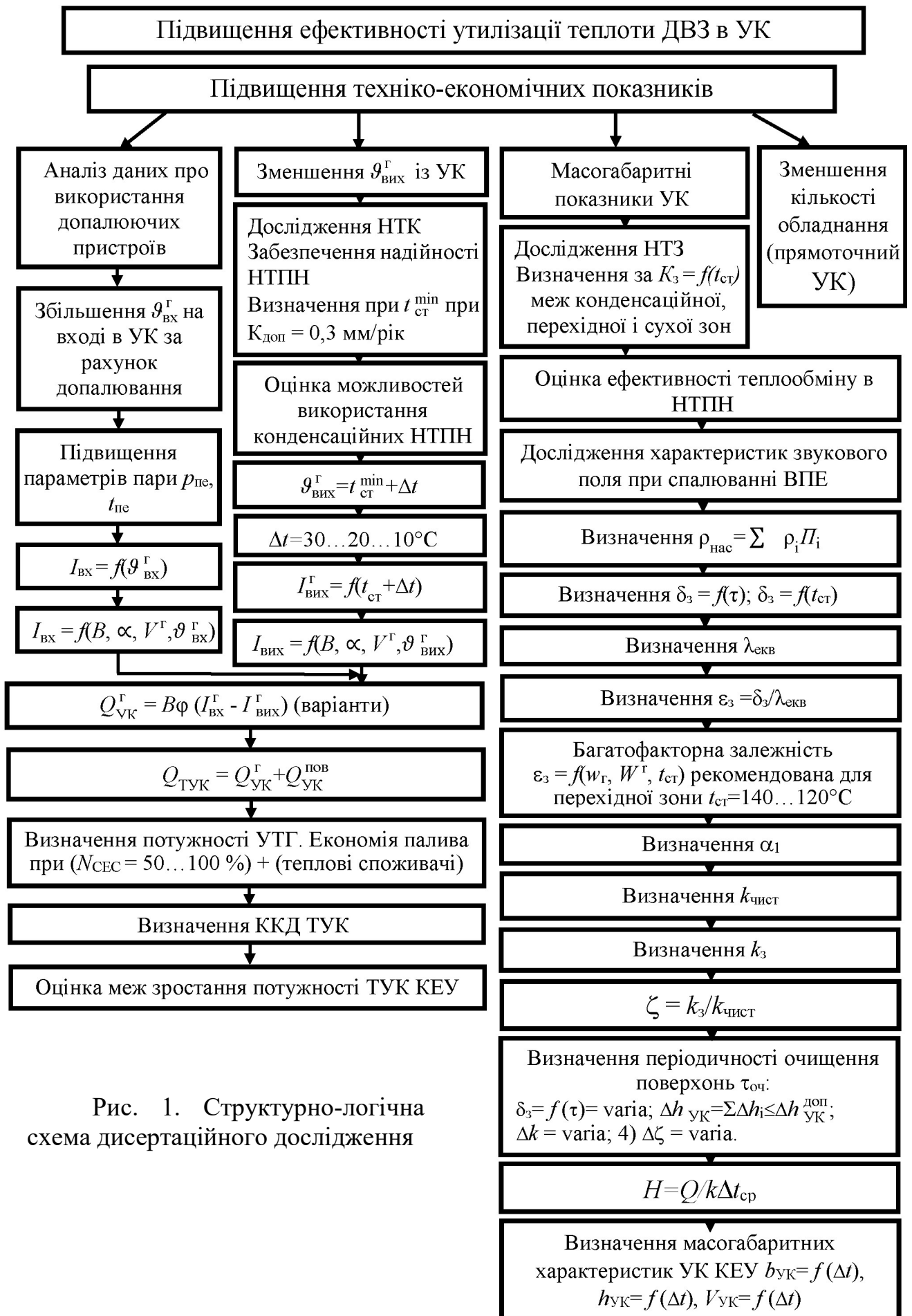
Оцінка впливу різних чинників на інтенсивність тепло- і масопереносу, корозію і забруднення НТПН, масогабаритні показники можлива шляхом проведення аналітичних розрахункових досліджень котлів на ЕОМ з використанням нормативних методик, враховуючи результати, отримані при проведенні експериментальних досліджень корозії і забруднення поверхонь нагріву при використанні ВПЕ.

З метою отримання надійних і достовірних даних проведені дослідження на експериментальній установці, де легше забезпечити стабільність всіх процесів. Це важливо у зв'язку з багатфакторною залежністю інтенсивності корозії і забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву УК при використанні сірчистих палив і приготованих на їх основі ВПЕ.

Для скорочення тривалості трудомістких дослідів, забезпечення можливості прогнозувати розвиток процесів забруднення, визначення механізму цих процесів проведені експериментальні дослідження кінетики їх розвитку. Визначення питомої втрати маси металу ΔG_k трубних зразків внаслідок НТК і питомої маси забруднення ΔG_z їх зовнішньої поверхні здійснювалось гравітаційним методом.

Збірки з трьох трубних зразків встановлювались в газозоді експериментальної установки при швидкості газів 7...8 м/с і їх температурі близько 200 °С. В камері згоряння спалювались мазут і ВПЕ з різним вмістом W^r при значеннях коефіцієнта надлишку повітря α в межах 1,1...3,0. Для проведення експериментальних досліджень на діючому УК були виготовлені спеціальні зонди з трубними зразками. В газозоді УК між пакетами встановлювались 4 зонди, що забезпечувало вимірювання ΔG_k і ΔG_z через 2, 4, 8 і 12 годин. Температура газів і зразків вимірювалась за допомогою термопар ХК, які були зачеканені в металеві прокладки між трубними зразками. Склад газів визначався за допомогою газоаналізатора ОКСИ-5М. Підтверджено, що використані засоби вимірювання дозволяють отримати необхідну точність визначення досліджених параметрів.

На всіх етапах досліджень особлива увага приділялась перевірці адекватності прийнятих моделей процесів: залежностей кінетики процесів корозії і забруднення встановлених при дослідженнях за 2, 4, 8, 12 годин шляхом порівняння з експериментальними даними за 100 годин. Дані за 1000 годин при використанні мазуту порівнювались з опублікованими кількісними даними. На основі цього вважалось, що невідомі кількісні дані при використанні ВПЕ, що одержані за тією ж методикою є достовірними.



Прийнята модель оцінки пористості Π , насипної густини $\rho_{\text{нас}}$, коефіцієнта еквівалентної теплопровідності $\lambda_{\text{екв}}$ і знайдені таким шляхом коефіцієнти забруднення ε_3 для сухих НТПН порівнювались з рекомендаціями нормативних документів, за результатами чого можна стверджувати, що значення тих же показників при використанні ВПЕ є достовірними. Встановлені на основі вказаних даних значення періодичності очищення для сухих поверхонь при використанні мазуту і ВПЕ порівнювались з опублікованими експлуатаційними даними.

Третій розділ присвячено дослідженням теплофізичних і теплохімічних процесів корозії та забруднення, що впливають на формування шару забруднень певної товщини і його термічний опір при використанні рідкого палива і ВПЕ на його основі.

Проведені дослідження кінетики НТК на реальному УК і експериментальній установці (вказані тільки основні режими) при температурі стінки $t_{\text{ст}} = 110^\circ\text{C}$, що відповідає корозійному піку, дозволили одержати апроксимаційні рівняння, що дозволяють прогнозувати розвиток процесів корозії. Розвиток процесів корозії достовірно апроксимується степеневими залежностями виду $\Delta G_3 = A \cdot \tau^n$ при похибці вимірювань 5...10 %, що допустимо при дослідженнях процесів, що розглядаються.

Проведені дослідження кінетики НТК дозволили отримати напівемпіричні залежності $\Delta G_k = f(S^r)$, $\Delta G_k = f(\alpha)$, $\Delta G_k = f(W^r)$, які показали, що при водовмісті ВПЕ близько 30 % інтенсивність процесів корозії істотно знижується (рис. 2).

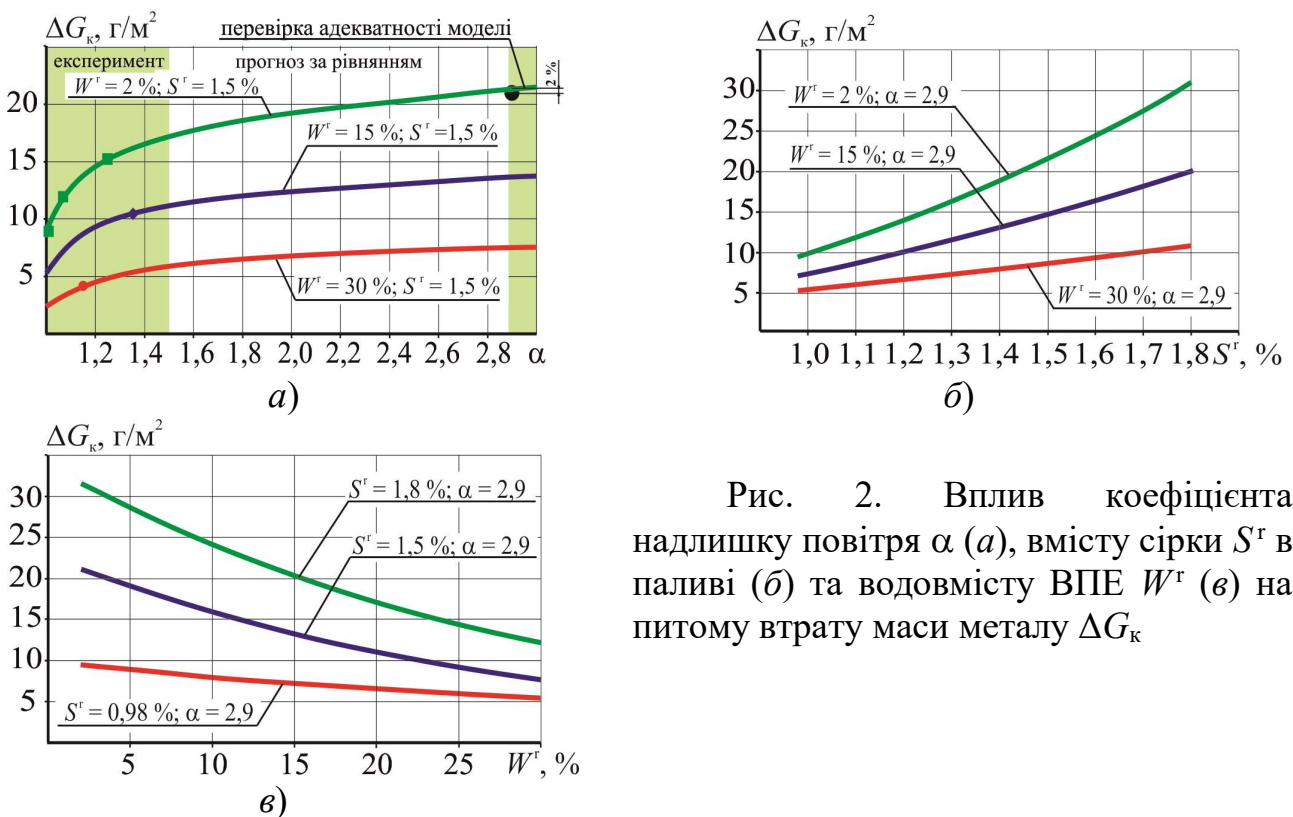


Рис. 2. Вплив коефіцієнта надлишку повітря α (а), вмісту сірки S^r в паливі (б) та водовмісту ВПЕ W^r (в) на питому втрату маси металу ΔG_k

Для оцінки впливу на інтенсивність корозії ΔG_k якості палива, що спалюється, і режимів його спалювання було проведено комп'ютерне моделювання методом планування експерименту в середовищі спеціалізованого статистичного програмного пакету Statgraphics Centurion XV.

В якості факторів, що впливають на показники НТК розглянуто вплив:

водовмісту ВПЕ W^r і вмісту сірки S^r у вихідному паливі, а також коефіцієнту надлишку повітря α .

Отримане рівняння регресії для моделі інтенсивності процесу корозії:

$$\Delta G_k = -2,5226 + 0,4509 W^r - 8,577 \alpha + 17,0426 S^r + 0,0102 (W^r)^2 - 0,0731 W^r \alpha - 0,7273 W^r S^r + 2,0115 \alpha^2 + 0,3267 \alpha S^r + 3,3212 (S^r)^2$$

Переважаючий вплив на інтенсивність корозії ΔG_k мають вміст сірки S^r у вихідному паливі, а потім вміст води W^r у ВПЕ і коефіцієнт надлишку повітря α .

На основі експериментальних даних одержані залежності швидкості корозії від температури стінки за 100 і 1000 годин (рис. 3).

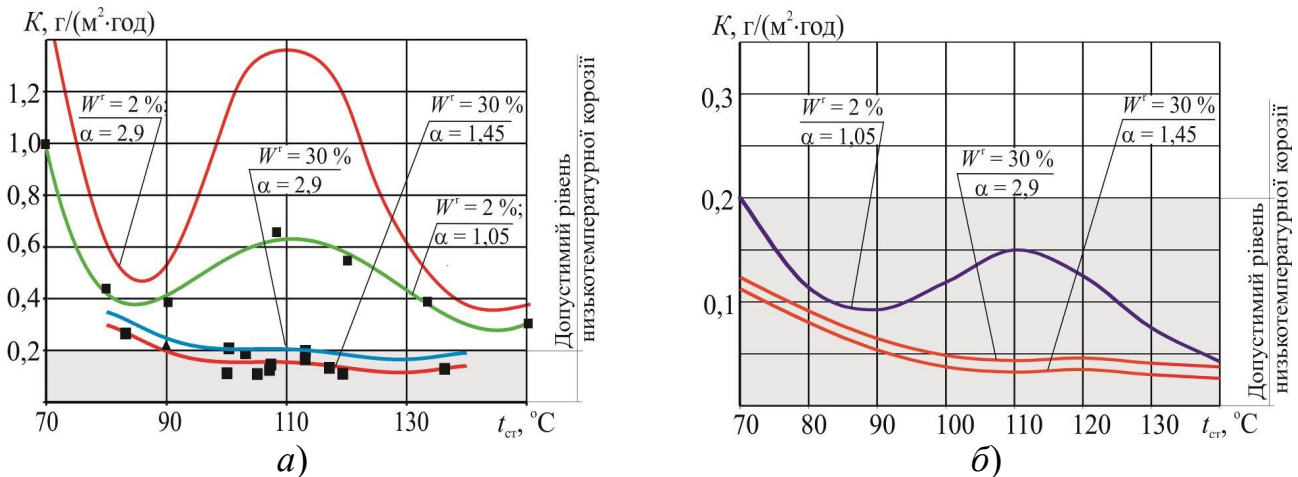


Рис. 3. Залежність швидкості корозії від температури стінки при різних α і W^r при $\tau = 100$ годин (експеримент) (а), $\tau = 1000$ годин (прогноз) (б)

Результати досліджень НТК (рис. 3) дозволяють встановити мінімальне значення температури стінки конденсаційної НТПН $t_{ст}^{min} = 70^\circ \text{C}$, при якому забезпечується надійна робота НТПН при допустимій швидкості $0,25 \text{ мм/рік}$. Це значення $t_{ст}^{min}$ дає змогу визначити мінімальну температуру газів на виході із УК, прийнявши відповідне значення температурного напору Δt .

Згідно результатам експериментальних досліджень інтенсивності забруднення одержані залежності кінетики забруднення, на основі яких знайдені апроксимаційні рівняння, що дають можливість прогнозувати розвиток процесів забруднення на будь-яких час.

На підставі отриманих експериментальних даних і апроксимаційних рівнянь отримані напівемпіричні залежності питомої маси забруднення ΔG_3 від вмісту сірки $\Delta G_3 = f(S^r)$, води $\Delta G_3 = f(W^r)$ і коефіцієнта надлишку повітря α $\Delta G_3 = f(\alpha)$ (рис. 4).

Статистична обробка даних дозволила отримати рівняння, що враховує вплив на величину ΔG_3 коефіцієнта надлишку повітря α , вмісту сірки S^r в паливі та води W^r в ВПЕ у вигляді

$$\Delta G_3 = 119,896 + 2,0218 W^r - 168,875 \alpha + 198,06 S^r - 0,0687 (W^r)^2 + 0,2881 W^r \alpha - 1,7212 W^r S^r + 26,313 \alpha^2 + 14,3069 \alpha S^r - 29,7926 (S^r)^2.$$

Аналіз результатів показав, що на величину ΔG_3 перш за все впливає вміст сірки S^r і води W^r в ВПЕ, а потім надлишок повітря α .

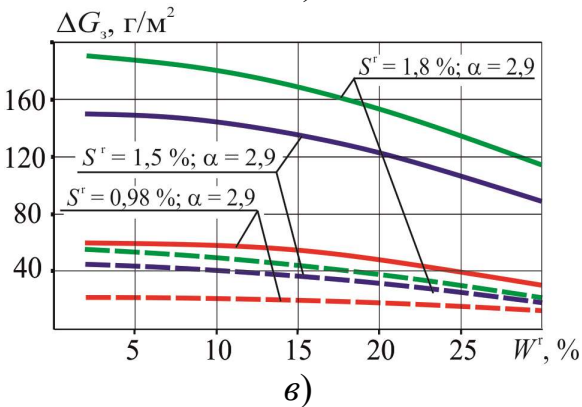
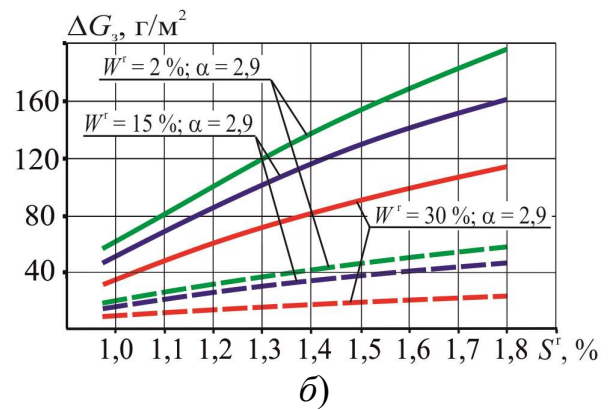
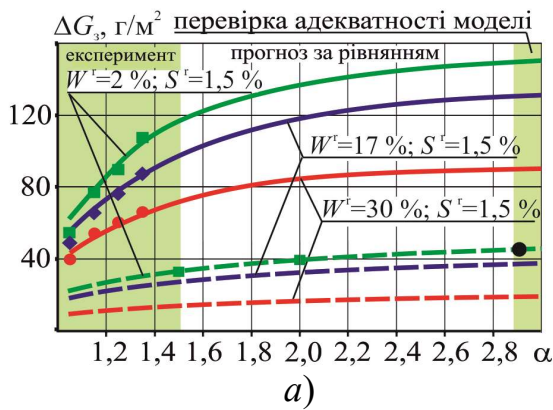


Рис. 4. Вплив коефіцієнта надлишку повітря α (а), вмісту сірки в паливі S^r (б) та вмісту ВПЕ W^r (в) на питому масу забруднення ΔG_3
 — мазут; --- малов'язке паливо

На підставі проведених досліджень, даних кінетики розвитку забруднення, диференціювання отриманих апроксимаційних рівнянь на рис. 5 представлені залежності швидкості забруднення при часі дії потоку газів $\tau = 8$ годин і $\tau = 1000$ годин.

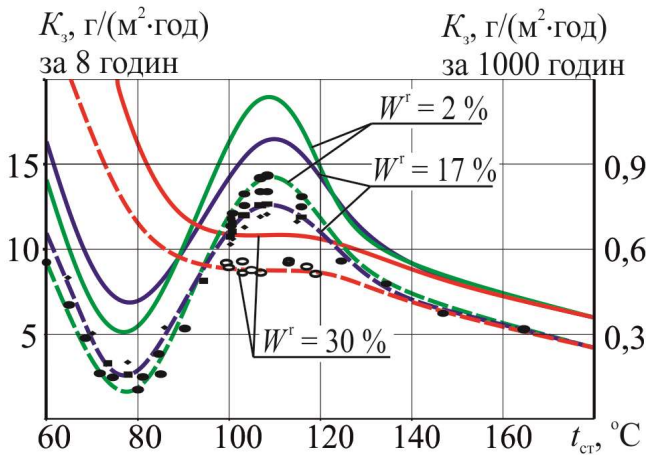


Рис. 5. Залежності швидкості забруднення $K_3 = f(t_{\text{ст}})$ при часі дії потоку газів $\tau = 8$ год і $\tau = 1000$ год
 — $\alpha = 2,9$; --- $\alpha = 1,5$

Отримані залежності швидкості НТК (рис. 3) і швидкості забруднення (рис. 5) дозволили визначити межі зон температури стінки $t_{\text{ст}}$, в яких мають місце сухий ($t_{\text{ст}} = 180 \dots 140 ^\circ\text{C}$), парорідинний ($t_{\text{ст}} = 140 \dots 120 ^\circ\text{C}$) і рідинний (конденсаційний) ($t_{\text{ст}}$ нижче $120 ^\circ\text{C}$) режими роботи НТПН при використанні рідких палив і ВПЕ на їх основі.

В четвертому розділі представлені експериментально-теоретичні дослідження особливостей процесів теплопровідності при використанні ВПЕ.

Значення коефіцієнтів еквівалентної теплопровідності шару забруднень конвективних поверхонь суттєво залежить від їх пористості Π . Для проведення досліджень прийнята модель пористості вільно насипаних сферичних часток і їх фрагментів з урахуванням можливого "вилучення" частини з них.

На основі проведених досліджень прийнято, що для сухих поверхонь при використанні необводненого мазуту (W^r до 2 %) $\Pi = 0,7$, а при використанні емульсії з водовмістом W^r до 30 % пористість збільшується до 0,9. На конденсаційних поверхнях при використанні мазуту – $\Pi = 0,3$, а при використанні ВПЕ – $\Pi = 0,48$.

Прийняті формули значень $\lambda_{\text{екв}}$ і отримані залежності розрахункових досліджень показують, що значення коефіцієнта еквівалентної теплопровідності забруднень $\lambda_{\text{екв}}$ залежить від пористості, форми і розмірів часток в шарі, складу і властивостей середовища, що заповнює порожнечі між частками, при відповідних температурах стінки в залежності від водовмісту W^r ВПЕ. Зі збільшенням вологості відкладень в парокислотній зоні теплопровідність суттєво збільшується (рис. 6) і має різні значення в трьох зонах температур стінки $t_{\text{ст}}$.

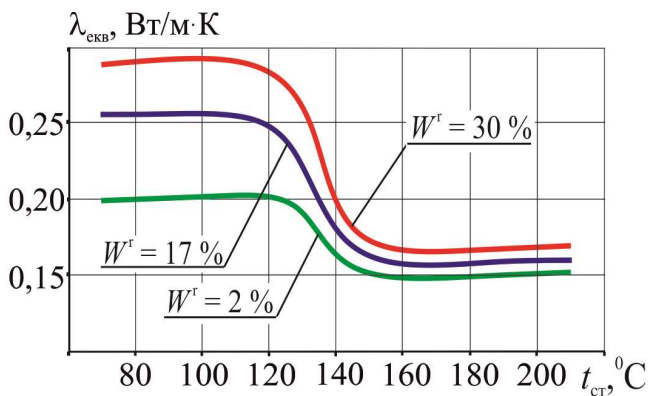


Рис. 6. Залежність коефіцієнта еквівалентної теплопровідності шару забруднень $\lambda_{\text{екв}}$ від температури стінки $t_{\text{ст}}$ і водовмісту W^r при використанні рідкого палива і ВПЕ

При конденсації пари конвективний теплообмін супроводжується масообміном (конденсацією з парогазової суміші), що за інших рівних умов збільшує коефіцієнт тепловіддачі в порівнянні з теплообміном сухого газу на величину $(1 + \phi_m)$, де ϕ_m - безрозмірний параметр, що враховує тепловіддачу з перенесенням теплоти і маси (напрямки перенесення збігаються). При цьому враховувалась наявність в шарі забруднень внутрішніх джерел теплоти внаслідок фізичних і хімічних процесів при конденсації H_2SO_4 і абсорбції NO_x , що збільшує тепловий потік на 10 %.

В п'ятому розділі представлені результати досліджень значень термічного опору шару забруднень і його впливу на інтенсивність теплообміну, а також на періодичність очищення.

На основі проведених експериментальних досліджень кінетики забруднення поверхонь нагріву і отриманих за їх результатами залежностей інтенсивності забруднення від температури стінки $t_{\text{ст}}$ можливе визначення товщини забруднень δ_3 при різних умовах. Для цього знайдена насипна густина цих забруднень $\rho_{\text{нас}}$ в залежності від пористості шару Π , розмірів, форми і упаковки твердих часток у шарі забруднень на конденсаційній і сухій поверхнях.

На основі прийнятих припущень і експериментальних даних шляхом проведення розрахункових досліджень можливих товщин шару забруднення δ_3 були знайдені залежності $\delta_3 = f(t_{\text{ст}})$ в трьох зонах (рис. 7) при часі дії потоку газів $\tau = 1000$ годин.

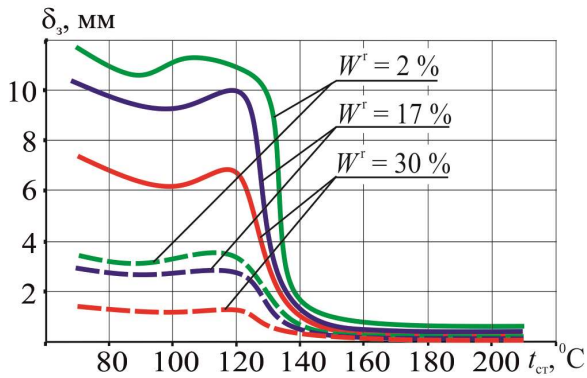


Рис. 7. Залежність товщини забруднень δ_3 від температури стінки $t_{ст}$ при використанні рідкого палива і ВПЕ (при $\tau = 1000$ годин)
 — мазут; --- малов'язке паливо

В результаті проведених розрахункових досліджень отримані значення коефіцієнтів забруднення ϵ_3 від температури стінки $\epsilon_3 = f(t_{ст})$ (рис. 8), які показали, що при однакових температурах стінки $t_{ст}$ при використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$ на основі мазуту М40 значення коефіцієнтів забруднення ϵ_3 істотно нижчі, ніж при використанні мазуту з водовмістом $W^r = 2\%$: в зоні мокрих забруднень - в 2,6 рази; в зоні сухих забруднень - в 2 рази.

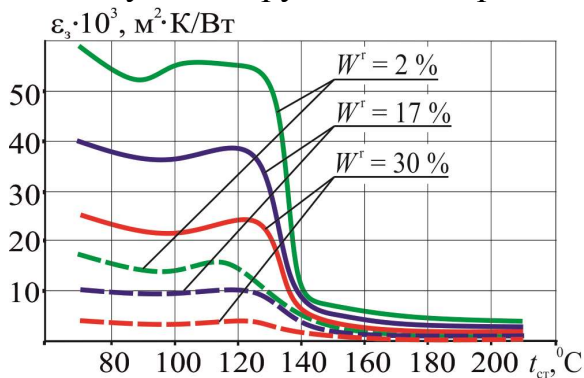
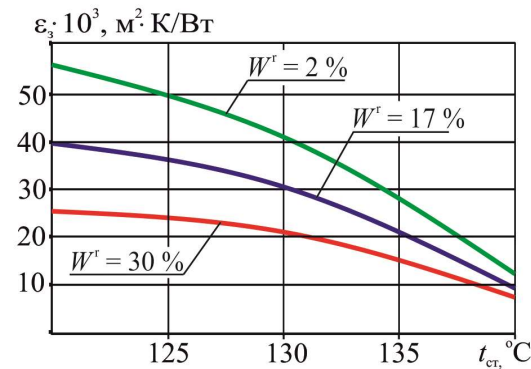
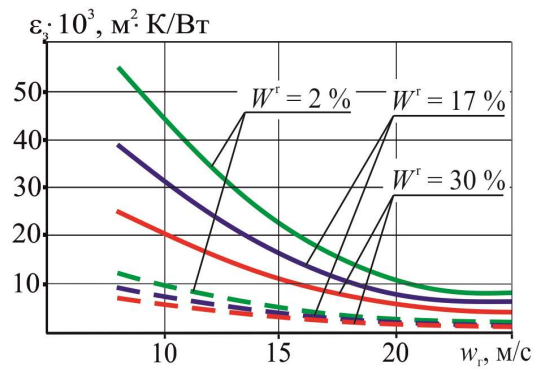


Рис. 8. Залежність коефіцієнта забруднення ϵ_3 від температури стінки $t_{ст}$ при використанні рідкого палива і ВПЕ (при $\tau = 1000$ годин)
 — мазут; --- малов'язке паливо

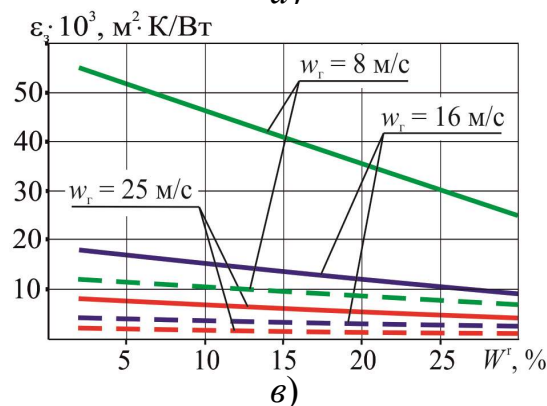
Отримані залежності коефіцієнта забруднення ϵ_3 від температури стінки $t_{ст}$, швидкості газів w_r та водовмісту ВПЕ W^r для парорідинної зони (рис. 9).



а)



б)



в)

Рис. 9. Вплив температури стінки $t_{ст}$ (а), швидкості газів w_r (б) та водовмісту ВПЕ W^r (в) на коефіцієнт забруднення ϵ_3
 — $t_{ст} = 120^\circ\text{C}$; --- $t_{ст} = 140^\circ\text{C}$

Статистична обробка даних дозволила отримати регресійне рівняння, що враховує вплив на величину коефіцієнта забруднення ε_3 температури стінки $t_{\text{ст}}$, швидкості газів $w_{\text{Г}}$ та вмісту ВПЕ W^r у вигляді:

$$\varepsilon_3 = (207,419 - 0,1797t_{\text{ст}} - 3,6845W^r - 11,3073w_{\text{Г}} - 0,0072(t_{\text{ст}})^2 + 0,0226t_{\text{ст}}W^r + 0,0571t_{\text{ст}}w_{\text{Г}} + 0,0002(W^r)^2 + 0,0233W^rw_{\text{Г}} + 0,066(w_{\text{Г}})^2) \cdot 10^{-3}$$

На величину коефіцієнта забруднення ε_3 перш за все впливає швидкість газів $w_{\text{Г}}$, температура стінки $t_{\text{ст}}$ і вміст води W^r у ВПЕ.

На основі залежності $\varepsilon_3 = f(\tau)$ одержані значення періодичності очищення для сухої поверхні нагріву при використанні мазуту і ВПЕ (рис. 10).

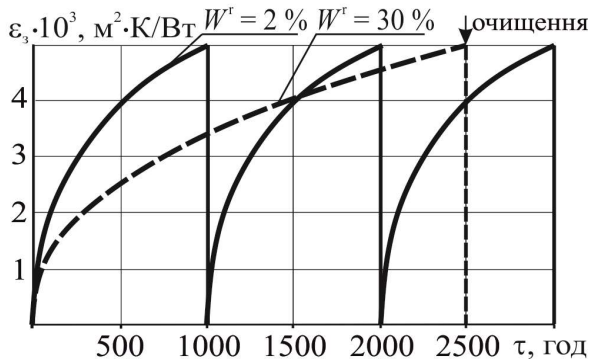


Рис. 10. Визначення періодичності очищення при досягненні однакового коефіцієнта забруднення для сухої поверхні нагріву

Отримані значення коефіцієнтів теплопередачі k_3 при температурах поверхні нагріву в діапазоні 70...210 °С при використанні рідкого палива і ВПЕ (рис. 11).

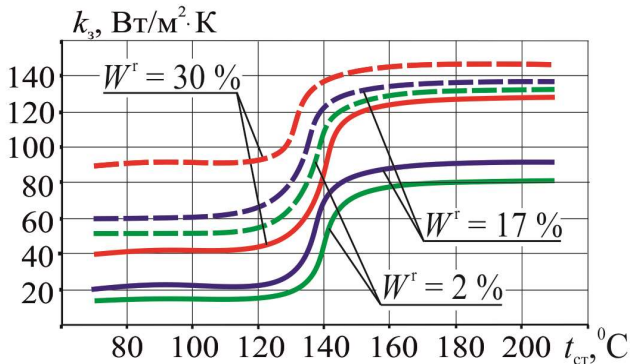


Рис. 11. Залежність коефіцієнта теплопередачі k_3 забрудненої поверхні нагрівання від температури стінки $t_{\text{ст}}$ (при $\tau = 1000$ годин) при використанні різних палив
— мазут; ---- малов'язке паливо

Отримані при однакових умовах розрахункові дані залежності коефіцієнтів теплової ефективності ζ (відношення коефіцієнтів теплопередачі забрудненої і чистої поверхонь) (рис. 12) показують, що при використанні ВПЕ з вмістом $W^r = 30\%$ значення інтенсивності теплопередачі НТПН вище практично в 2 рази в порівнянні з використанням рідкого палива з вмістом $W^r = 2\%$ при температурах стінки $t_{\text{ст}}$ нижче 130 °С.

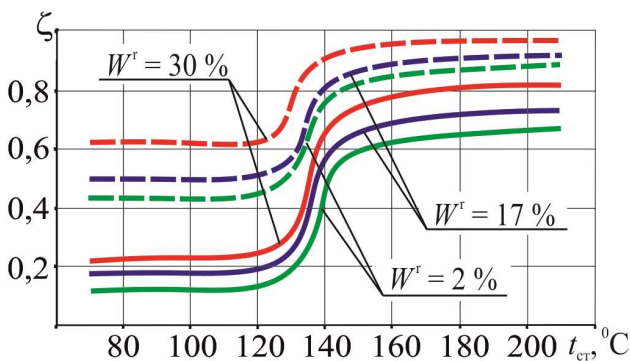


Рис. 12. Залежність коефіцієнта теплової ефективності ζ від температури стінки $t_{\text{ст}}$ (при $\tau = 1000$ годин) при використанні різних палив
— мазут; ---- малов'язке паливо

Істотне зниження коефіцієнта теплової ефективності в конденсаційній зоні при часі впливу потоку газів $\tau = 1000$ годин (рис. 13) вказує на те, що з метою одержання високих значень коефіцієнта теплової ефективності ζ необхідно зменшувати період між «сильними» очищеннями (наприклад, шляхом обмивки) до 8 годин.

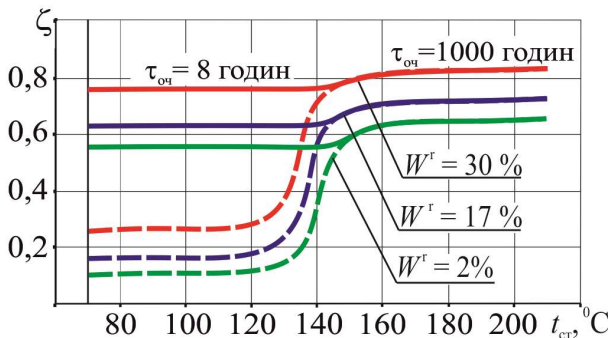


Рис. 13. Забезпечення максимальних значень коефіцієнта теплової ефективності конденсаційних поверхонь нагріву при використанні мазуту і ВПЕ

У шостому розділі представлені схеми утилізації теплоти КЕУ з допалюванням додаткового палива перед УК і при установці конденсаційних НТПН. Розраховані масогабаритні характеристики УК.

При включенні до складу КЕУ утилізаційного турбогенератора (УТГ) маневрені характеристики КЕУ істотно розширюються. Основними питаннями додаткового вироблення електроенергії за рахунок утилізації теплоти продуктів згоряння є виробництво турбін невеликої потужності, а також оцінка економічної доцільності створення таких установок.

Для розширення можливостей регулювання співвідношення електричної і теплової потужності в КЕУ, яке необхідне при коливаннях добового і сезонного навантажень, запропоновано допалювання палива перед УК. Допалювання палива дає можливість регулювати витрати пари і потужність УТГ, тобто забезпечувати різне теплове навантаження споживачів і вироблення додаткової електричної енергії в УТГ.

При допалюванні палива до 20 % від витрати палива на приводний двигун температура газів зростає з 350 °C до 565 °C. Зростання температури газів дає можливість застосувати більш високі параметри пари, що виробляється, і застосовувати більш високий перегрів.

Для більш глибокої утилізації при використанні ВПЕ з водовмістом біля 30 % необхідно встановлювати конденсаційні поверхні, до яких можливо підводити живильну воду з температурою на рівні 70 °C за рахунок зниження інтенсивності НТК.

Були проведені розрахунки різних схем теплоутилізаційних контурів КЕУ (рис. 14, 15), що працюють на мазуті і ВПЕ. Отримані при однаковому електричному і тепловому навантаженні значення витрати палива показали, що при використанні допалювання палива перед УК замість водогрійного котла для забезпечення теплових споживачів, витрата палива на КЕУ знижується на 12 % (рис. 16). Використання ВПЕ на цьому ж режимі знижує витрату палива на 16 %.

Аналіз виконаних розрахунків (рис. 17) вказує на доцільність застосування допалювання палива в схемах КЕУ з УК двох тисків, що залежить насамперед від економічності ДВЗ та температури відпрацьованих газів.

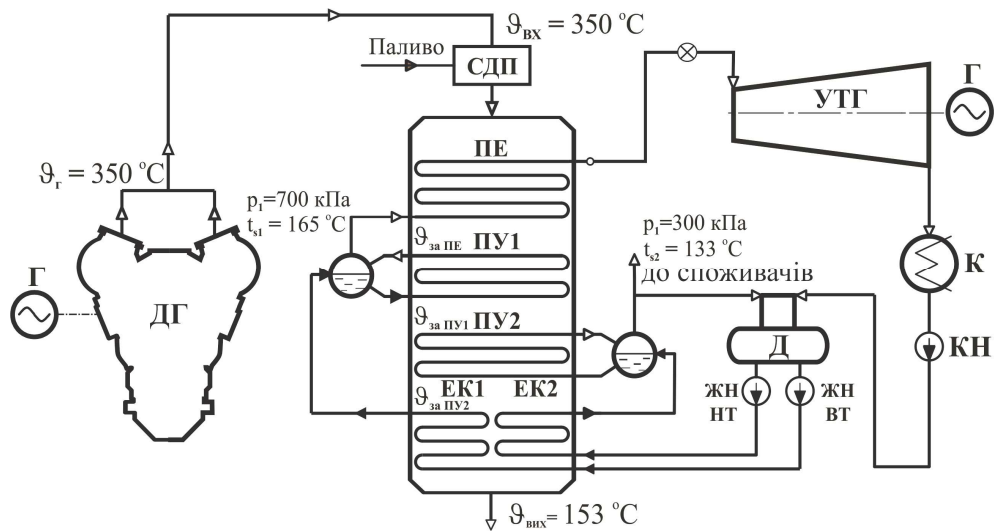


Рис. 14. Теплова схема теплоутилізаційного контуру КЕУ, що працює на мазуті: ПЕ – пароперегрівач високого тиску; ПУ1, ПУ2 – пароутворююча поверхня високого і низького тиску; ЕК1, ЕК2 – економайзер високого і низького тиску; УТГ – утилізаційний турбогенератор; К – конденсатор; КН – конденсатний насос; ЖН ВТ, ЖН НТ – живильний насос високого і низького тиску; СДП – система допалювання палива; Д – деаератор; ДГ – дизель-генератор; Г – генератор

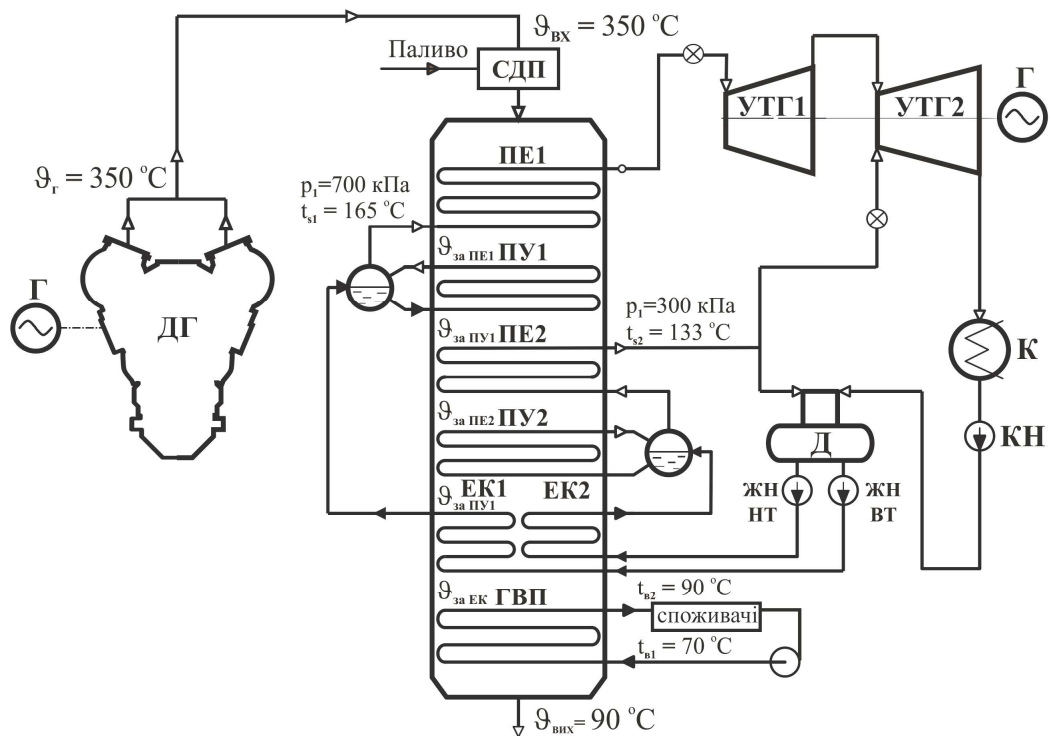


Рис. 15. Теплова схема теплоутилізаційного контуру КЕУ, що працює на ВПЕ: ПЕ1, ПЕ2 – пароперегрівач високого і низького тиску; ПУ1, ПУ2 – пароутворююча поверхня високого і низького тиску; ЕК1, ЕК2 – економайзер високого і низького тиску, ГВП – секція гарячого водопостачання (конденсаційна НТПН); УТГ1, УТГ2 – утилізаційний турбогенератор; К – конденсатор; КН – конденсатний насос; ЖН ВТ, ЖН НТ – живильний насос високого і низького тиску; СДП – система допалювання палива; Д – деаератор; ДГ – дизель-генератор; Г – генератор

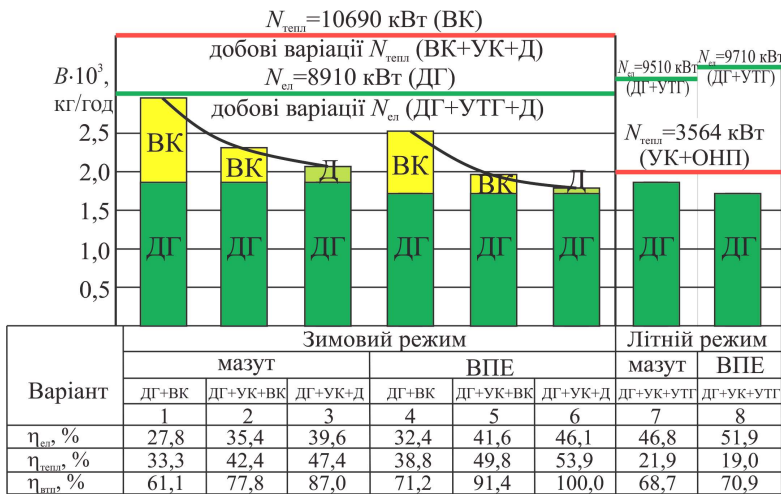


Рис. 16. Економічні позники КЕУ:
ДГ - дизель-генератор, ВК - водогрійний котел, УК – утилізаційний котел, Д - додаткове допалювання палива

Порівняльні дослідження габаритних характеристик поверхонь нагріву УК (рис. 18-20) проведені за умови однакового аеродинамічного опору УК ($\Delta h_{\text{УК}} = \text{const}$) при постійній швидкості газів ($w_{\text{Г}} = \text{const}$), що забезпечує однакову інтенсивність конвективного теплообміну в поверхнях нагріву УК. Для забезпечення умов $w_{\text{Г}} = \text{const}$ при $\Delta h_{\text{УК}} = \text{const}$ змінювалось значення ширини газоходу b при постійній довжині $l = \text{const}$.

Розрахунки показали, що при установці конденсаційних поверхонь нагріву в УК, що можливо при використанні ВПЕ, зростає сумарна потужність і паропроодуктивність УК. Зростання потужності УК пропорційне зростанню його габаритних показників (рис. 18).

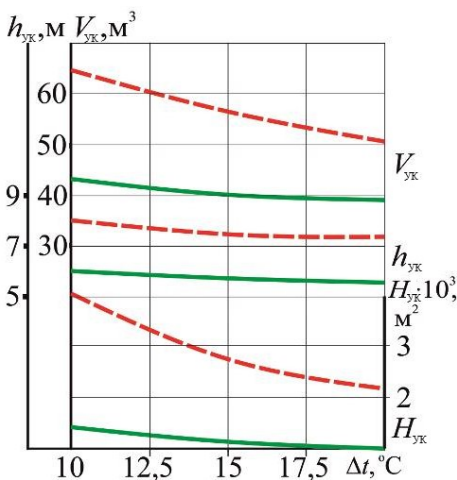


Рис. 18. Залежність об'єму $V_{\text{УК}}$, висоти $h_{\text{УК}}$ і площі поверхні нагріву УК на мазуті і ВПЕ від Δt

—- КЕУ, що працює на мазуті; --- - КЕУ, що працює на ВПЕ

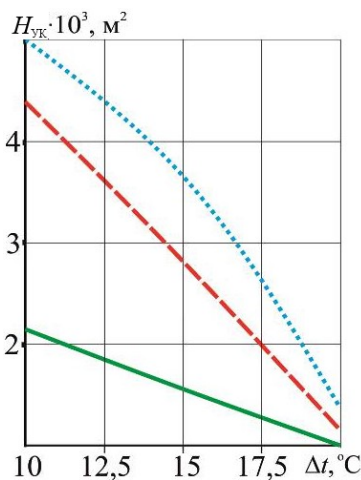


Рис. 19. Залежність площі поверхонь нагріву $H_{\text{УК}}$ різних схем УК від Δt

----- - котел з багаторазовою примусовою циркуляцією (протитечія), --- - котел з багаторазовою примусовою циркуляцією (прямотечія), —- - прямотечійний котел

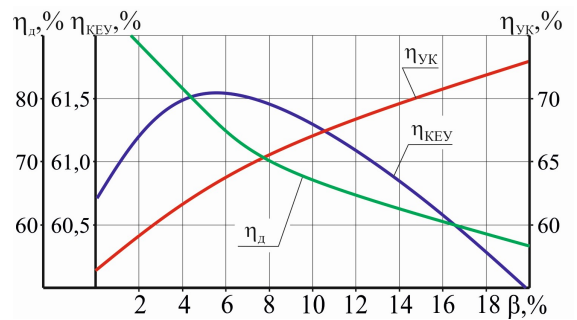


Рис. 17. Залежність ККД УК $\eta_{\text{УК}}$, ККД допалювання $\eta_{\text{Д}}$, ККД КЕУ $\eta_{\text{КЕУ}}$ від доли палива, що додатково допалюється в газоході перед УК β

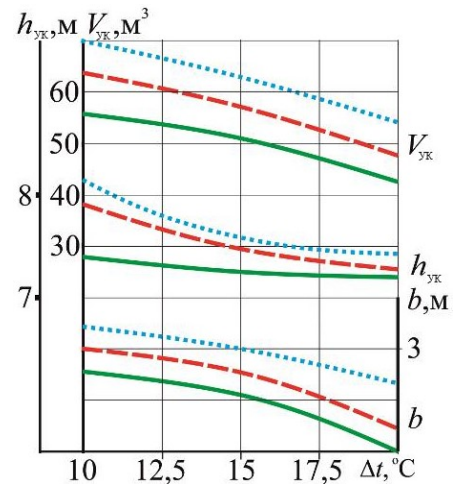


Рис. 20. Залежність об'єму $V_{\text{УК}}$, висоти $h_{\text{УК}}$ і ширини b УК різних схем від Δt

Зменшення значень різниці температур між температурою поверхні нагріву і температурою газів за поверхнею Δt приводить до збільшення теплової потужності і зменшення середньологарифмічної різниці температур $\Delta t_{\text{сер}}$, зростання необхідної площі поверхонь нагріву $H_{\text{ук}}$, об'єму $V_{\text{ук}}$ і висоти $h_{\text{ук}}$ (рис. 19, 20). Найменші значення габаритних показників відповідають прямотечійному котлу. Крім того, в прямотечійній схемі котла відсутні сепаратори пари, циркуляційні насоси, капітальні витрати на які складають половину (і більше) вартості поверхонь нагріву УК.

Як показали проведені дослідження, при використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$ на виході із зони горіння внаслідок фізико-хімічних процесів, які проходять у відхідних газах, утворюється суміш оксидів азоту з співвідношенням компонентів $\text{NO}_2 : \text{NO}$ близького до еквімолярного співвідношення 0,35...0,5, за якого при температурах поверхні нижче температури точки роси пари кислоти H_2SO_4 має місце найбільш інтенсивна абсорбція конденсатом сірчаної кислоти оксидів азоту NO_x і сірки SO_2 , що підтверджується отриманим патентом на винахід.

На основі отриманих результатів розроблена схема установки (рис. 21), яка забезпечує енергоресурсозбереження, очищення газів і надійність конденсаційних поверхонь нагріву УК при використанні ВПЕ на основі сірчистих палив.

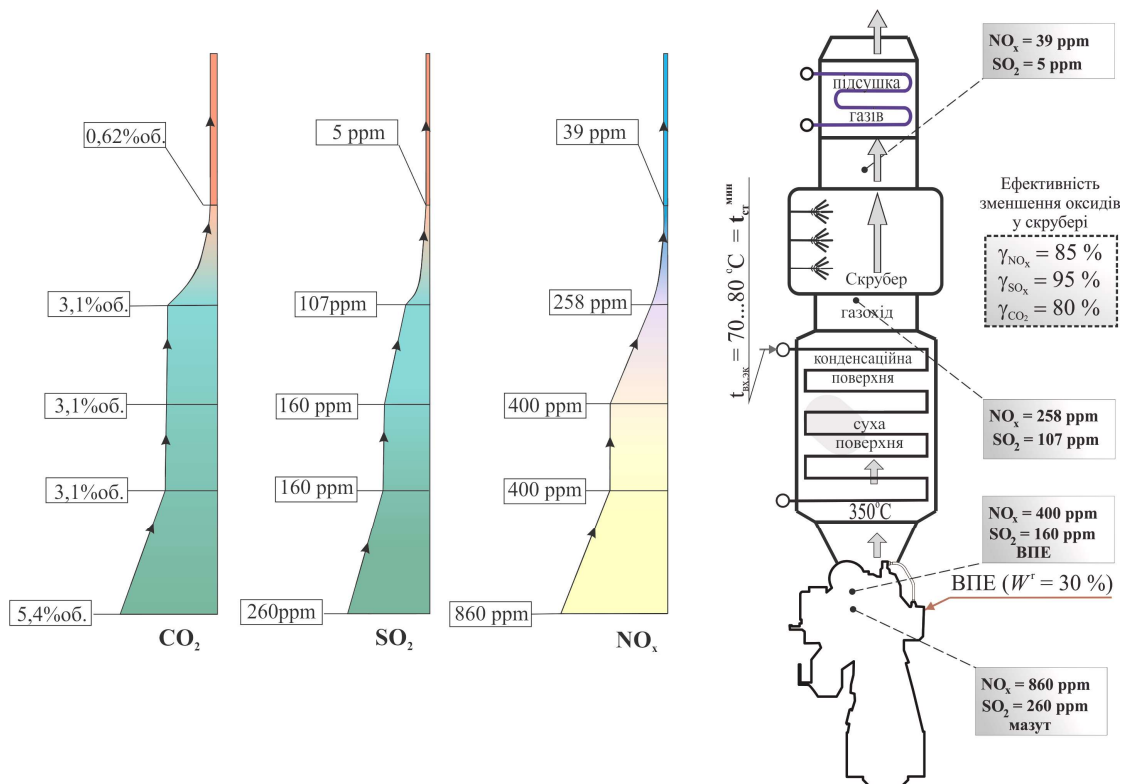


Рис. 21. Схема установки для зниження викидів шкідливих речовин при використанні ВПЕ

Як видно, використання конденсаційної поверхні нагріву дозволяє суттєво знизити концентрацію оксидів азоту і сірки – на 65 %.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що у разі використання водопаливної емульсії з водовмістом 30 % при температурах стінки $t_{\text{ст}}$ нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти $t_{\text{рH}_2\text{SO}_4}$ і значеннях коефіцієнта надлишку повітря α від 1,5 до 3,0 та вмісті сірки у вихідному паливі до 2 % інтенсивність низькотемпературної корозії в 3,3 рази нижче, ніж при застосуванні палива з водовмістом 2 %.

2. Отримані залежності швидкості корозії від температури стінки $t_{\text{ст}}$ при використанні водопаливної емульсії з водовмістом 30 % і дії потоку газів упродовж $\tau = 1000$ годин показали, що в межах температур стінки $t_{\text{ст}}$ від 140 до 70 °C швидкість низькотемпературної корозії нижче допустимого рівня 0,25 мм/рік, що дозволяє знизити температуру відхідних газів до 90 °C і збільшити глибину утилізації відхідних газів на 20 %.

3. В результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що пористість забруднень на конденсаційних низькотемпературних поверхнях нагріву при застосуванні водопаливної емульсії становить 0,48, мазуту – 0,3, а для сухих поверхонь пористість становить: при використанні водопаливної емульсії – 0,9, а мазуту – 0,7.

4. Отримані залежності коефіцієнта забруднення від температури стінки $\varepsilon_3 = f(t_{\text{ст}})$ низькотемпературних поверхонь нагріву при застосуванні рідкого палива і водопаливної емульсії та дії потоку газів упродовж $\tau = 1000$ годин дозволяють визначати межі значень температури стінки $t_{\text{ст}}$ для сухої ($t_{\text{ст}} = 210 \dots 140$ °C), парорідинної ($t_{\text{ст}} = 140 \dots 120$ °C) і конденсаційної зони ($t_{\text{ст}} = 120 \dots 70$ °C).

5. Встановлено, що для сухих поверхонь нагріву при використанні водопаливної емульсії з водовмістом 30 % і дії потоку газів упродовж $\tau = 1000$ годин та температурах стінки $t_{\text{ст}}$ більше 130 °C коефіцієнти забруднення ε_3 приблизно в 2,5 рази нижче, ніж для мазуту з водовмістом 2 %.

6. Показано, що для конденсаційних поверхонь нагріву при використанні водопаливної емульсії з водовмістом $W^r = 30$ % коефіцієнти забруднення ε_3 майже в 10 разів вищі порівняно з сухими поверхнями.

7. На основі проведених досліджень кінетики забруднення встановлено, що у разі використання водопаливної емульсії для отримання високих значень коефіцієнтів теплопередачі k_3 , теплової ефективності ζ конденсаційних поверхонь рекомендується зменшити періодичність між очищеннями до 8 годин (для сухих поверхонь нагріву при температурах стінки $t_{\text{ст}}$ вище 140 °C періодичність очищення становить 2500...3000 годин).

8. Результати розрахунків показали, що у разі застосування водопаливної емульсії з водовмістом $W^r = 30$ % і конденсаційної поверхні нагріву теплова потужність утилізаційного котла зростає на 25 % порівняно з використанням мазуту при одночасному зниженні концентрації оксидів азоту і сірки на 65 %.

9. Розроблена методика визначення залежності питомої втрати маси металу ΔG_k і питомої маси забруднення ΔG_3 з використанням кореляційних рівнянь, отриманих при менших значеннях коефіцієнта надлишку повітря $\alpha \approx 1,5$, забезпечує

прийнятну достовірність даних (в межах 5 %) і при більш високих значеннях коефіцієнта надлишку повітря $\alpha = 1,5 \dots 3,0$.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертації опубліковано в наукових спеціалізованих виданнях:

1. Корниенко В.С. Интенсивность процессов загрязнения поверхностей нагрева утилизационных котлов при сжигании водомазутных эмульсий. Авиационно-космическая техника и технология. 2017. № 1 (136). С. 48–53.

2. Корниенко В.С., Радченко А.Н., Андреев А.А., Щербак Ю.Г. Влияние загрязнения на тепловую эффективность поверхностей нагрева утилизационных котлов при использовании водотопливных эмульсий на основе маловязких топлив. Авиационно-космическая техника и технология. 2018. №2 (146). С. 28–32.

Особистий внесок: удосконалення методики визначення коефіцієнта теплової ефективності поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

3. Корниенко В.С. Вплив забруднення поверхонь нагрівання на інтенсивність теплопередачі в утилізаційних котлах при спалюванні водопаливних емульсій. Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки. 2017. вип.35. С. 78–86.

4. Корниенко В.С. Исследование работы ротационных форсунок. Авиационно-космическая техника и технология. 2013. №8 (105). С. 142–146.

5. Горячкин В.Ю., Корниенко В.С. Интенсивность коррозионных процессов в утилизационных котлах при сжигании водотопливных эмульсий. Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2013. №2. С. 101–110.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення інтенсивності корозії поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

6. Радченко А.М., Андреев А.А., Корниенко В.С. Забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів при спалюванні водопаливних емульсій на основі малов'язких палив. Авиационно-космическая техника и технология. 2018. № 1 (145). С. 43–47.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення інтенсивності забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

7. Спосіб захисту металу низькотемпературних поверхонь нагріву котла від сірчаноокисlotної корозії: пат. 99408 Україна: МПК C23F 11/10, F22B 37/00, F23J 15/00. №201110299; заявл. 23.08.11; опубл. 10.08.12, Бюл. №15.

Особистий внесок: розробка і аналіз механізму процесу пасивації поверхонь нагріву утилізаційних котлів від низькотемпературної сірчаноокисlotної корозії.

8. Спосіб підготовки водопаливної емульсії для енергетичних установок, в яких спалюється сірчисте органічне паливо: пат. 115037 Україна: МПК B01D 53/60, B01D 53/14, F02B 47/02, F02M 25/022, F23D 11/16. №201402318; заявл. 06.03.14; опубл. 11.09.17, Бюл. №17.

Особистий внесок: розробка схемно-конструктивних рішень системи очищення відхідних газів конденсаційними поверхнями нагріву утилізаційних котлів.

Основні публікації, в яких додатково викладено зміст дисертації:

9. Корниенко В.С. Исследование динамики низкотемпературной коррозии и загрязнения поверхностей нагрева утилизационных котлов. Рибне господарство України. 2013. №3(86). С. 62–65.

10. Корниенко В.С. Возможности комплексной утилизации теплоты судовых ДВС. Всеукраїнський форум молодих науковців "Макаровські читання". Миколаїв: НУК, 2012 р. С. 23–24.

11. Корнієнко В.С. Підвищення ефективності утилізації теплоти вихлопних газів ДВЗ при спалюванні водомазутних емульсій і при використанні судових прямооточних котлів. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2011. С. 200–203.

12. Корнієнко В.С. Інтенсивність низькотемпературної корозії в утилізаційних котлах при спалюванні водопаливних емульсій. Всеукраїнський форум молодих науковців "Макаровські читання". Миколаїв: НУК, 2013. С. 12-13.

13. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Эффективность допалювання водопаливних емульсій перед утилізаційними котлами. Сучасні інформаційні і інноваційні технології на транспорті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон: ХДМІ, 2017. С. 67-69.

Особистий внесок: удосконалення методики і проведення розрахунків теплоутилізаційних контурів при допалюванні палива перед утилізаційним котлом.

14. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Влияние загрязнения конденсационных поверхностей нагрева на интенсивность теплопередачи. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»: зб. тез доповідей. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. С. 100-102.

Особистий внесок: проведення розрахунків і аналіз результатів визначення коефіцієнта забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

15. Горячкин В.Ю., Корниенко В.С. Эффективность энергосбережения при сжигании сернистых водотопливных эмульсий. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2017. С. 198-199.

Особистий внесок: удосконалення методики визначення коефіцієнтів теплової ефективності конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

16. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Возможности применения конденсационных поверхностей нагрева при сжигании сернистых водотопливных эмульсий. Суднова енергетика: стан та проблеми: матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2017. С. 359-363.

Особистий внесок: аналіз можливостей використання конденсаційних поверхонь нагріву в утилізаційних котлах.

17. Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Іутінський В.О., Кондя В.С. Підвищення ефективності утилізації теплоти сучасних дизельних енергетичних установок. Сучасні інформаційні і інноваційні технології на транспорті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Том 2. Херсон: ХДМІ, 2010. С. 193–196.

Особистий внесок: аналіз існуючих схем утилізації теплоти енергетичних установок.

18. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Когенерационные установки с ДВС. Муніципальна енергетика: проблеми, рішення: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2011. С. 194–197.

Особистий внесок: розробка схемно-конструктивних рішень когенераційних установок.

19. Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Іутінський В.О., Корнієнко В.С. Эффективный спосіб захисту металу низькотемпературних поверхонь нагріву котла від сірчанокислотної

корозії. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С. 253–255.

Особистий внесок: аналіз механізмів захисту металу від низькотемпературної сірчаноокислотної корозії при використанні водопаливних емульсій.

20. Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Новиков В.И., Корниенко В.С. Исследования кинетики низкотемпературной коррозии и загрязнения поверхностей нагрева УК. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С. 280–281.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення кінетики процесів корозії і забруднення.

21. Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Корниенко В.С. Эффективность утилизации теплоты ДВС при дожиге топлива перед УК. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С. 256–257.

Особистий внесок: аналіз існуючих схем розрахунку теплоутилізаційних контурів з допалюванням палива перед утилізаційним котлом.

22. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Загрязнение конденсационных поверхностей нагрева утилизационных котлов при сжигании водомазутных эмульсий. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2016. С. 136–137.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення інтенсивності забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

23. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Улучшение экологических показателей при установке конденсационных поверхностей в утилизационных котлах. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2016. С. 281–282.

Особистий внесок: аналіз можливостей застосування конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів в системах очищення відхідних газів.

Праці [1–4, 6] опубліковано у виданнях, які входять до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus, [5] – до наукометричної бази даних РІНЦ.

АНОТАЦІЯ

Корнієнко В.С. Підвищення ефективності теплоутилізаційних контурів когенераційних установок при використанні водопаливних емульсій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – “Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика”. – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2018.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності теплоутилізаційних контурів когенераційних установок при використанні водопаливних емульсій шляхом скорочення викидів шкідливих речовин і зменшення споживання палива енергоустановкою за рахунок установки конденсаційної поверхні нагріву в утилізаційному котлі (УК) і збільшення глибини утилізації відхідних газів із УК.

На основі проведених експериментальних досліджень отримані напівемпіричні кореляційні залежності питомої втрати маси металу і питомої маси

забруднення від вмісту води в водопаливній емульсії, вмісту сірки у вихідному паливі і коефіцієнта надлишку повітря при температурах стінки нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти. Визначено, що мінімальне значення температури стінки, яке забезпечує надійну експлуатацію конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву, становить 70 °С. Розроблена тривимірна модель і отримане рівняння регресії для визначення питомої втрати маси металу і питомої маси забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву, які дозволяють проводити оцінку впливу різних факторів, таких як вміст води в водопаливній емульсії, вміст сірки у вихідному паливі і коефіцієнт надлишку повітря на інтенсивність корозії і забруднення. На основі проведених теоретичних досліджень пористості шару забруднень визначені значення коефіцієнта теплопровідності від температури стінки при використанні мазуту та водопаливної емульсії. Отримані аналітичні залежності коефіцієнтів забруднення для конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву від швидкості газів, вмісту води в водопаливній емульсії, температури стінки, які дозволяють оцінити періодичність очищення поверхонь нагріву при розробці режимів їх експлуатації. Розроблена тривимірна модель і отримане рівняння регресії, які описують коефіцієнт забруднення, які можуть бути застосовані при проектуванні конденсаційних поверхонь УК. Проведені розрахунки різних схем теплоутилізаційних контурів когенераційної установки з допалюванням додаткового палива перед УК. Показано, що при використанні конденсаційних поверхонь нагріву в УК зростає коефіцієнт утилізації на 20 %.

Ключові слова: водопаливна емульсія, утилізаційний котел, конденсаційна поверхня нагріву, корозія, забруднення.

ABSTRACT

Kornienko V.C. Increasing the efficiency of heat utilization circuits of cogeneration units with using of water-fuel emulsions. - The manuscript.

The thesis for Candidate of Technical Sciences degree in specialty 05.14.06 - "Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering". - Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2018.

The thesis is devoted to increase the efficiency of heat utilization circuits of cogeneration units with use of water fuels emulsions by reducing emissions of harmful substances and fuel consumption of power plant due to installation of condensation heating surface in exhaust gas boiler (EGB) and increasing depth of waste gas utilization from EGB.

Studies of low-temperature corrosion and contamination kinetics, which made it possible to obtain approximation equations for predicting processes development and shortening the experimental time, were carried out. Based on the experimental studies, the semiempirical correlation dependences of specific loss of metal mass and specific mass of pollution from water content of water-fuel emulsion, sulfur content in fuel oil and excess air factor at wall temperatures below the dew point temperature of sulfuric acid pair are obtained. It is determined that the minimum value of wall temperature, which provides reliable operation of condensation low-temperature heating surfaces, is 70 °C. A three-dimensional model is developed and the regression equation is obtained for determining

the specific loss of metal mass and the specific mass of pollution of low-temperature heating surfaces. Regression equation make it possible to estimate the influence of various factors such as water content of the water-fuel emulsion, sulfur content in fuel oil and excess air factor on the corrosion and pollution intensity. Based on theoretical studies contamination layer porosity, heat conductivity values were determined using fuel oils and water-fuel emulsions. The analytical relations of pollution coefficient for condensing low-temperature heating surfaces from speed of gases, water content of water-fuel emulsion, wall temperature, which allow to estimate the cleaning frequency of heating surfaces in the development of their operation modes, are obtained. The three-dimensional model is developed and the regression equation is obtained, which describes pollution coefficient that can be applied during design of EGB condensation surfaces. Analysis of the research results shows that the combustion of water-fuel emulsions with water content of 30% increases the value of heat transfer factor and thermal efficiency. Calculations of heat utilization circuits of cogeneration unit with using of fuel additional combustion before the EGB are carried out. It is shown that when using condensation heating surfaces in the EGB, the utilization factor is increased by 20 %. Based on the conducted studies of thermal and physicochemical processes in elements of cogeneration unit, a scheme of installation has been developed that provides energy-saving, gas cleaning and reliability of condensation heating surfaces of the EGB when using water-fuel emulsions with water content of 30 % based on sulfur fuels.

Key words: water emulsion, exhaust gas boiler, condensation heating surface, corrosion, pollution.

Підписано до друку 11.10.2018 р.
Формат 60х90/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times. Друк різнографічний.
Зам. № 17. Тираж 100 прим.

Надруковано ФОП Шуригіна Л.О.
Код за ЄДРПОУ: 2302711442
73000, м. Херсон, вул. Олешківська, 9б.
тел. 0991718122