

**Міністерство освіти і науки України  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова**

**Горячкін Андрій Володимирович**

**УДК 629.12:662.75**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ  
КОТЛИ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВОДОНАЛИВНИХ  
ЕМУЛЬСІЙ**

**Спеціальність 05.08.05 -суднові енергетичні установки**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Миколаїв – 2007**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** - кандидат технічних наук, професор,

**Горбов Віктор Михайлович,**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова завідувач кафедри ССЕСУ.

**Офіційні опоненти:** - доктор технічних наук, професор лауреат

Державної премії України,

**Дикий Микола Олександрович,** Київська державна академія водного транспорту, завідувач кафедри енергетики суден;

- кандидат технічних наук, професор

**Димо Борис Васильович,** Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, завідувач кафедри технічної теплофізики та суднових паровиробних установок

**Провідна установа** - Одеський національний морський університет Міністерства освіти і науки України, м. Одеса.

Захист відбудеться 24 квітня 2007 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, просп. Героїв Сталінграда, 9.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: м. Миколаїв, просп. Героїв Сталінграда, 9.

**Автореферат розісланий «    » березня 2007 р.**

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 38.060.02  
д-р техн. наук, професор

Тимошевський Б.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Зростання вартості рідкого палива призвело до необхідності спалювання важких сірчистих палив, що впливає на конструктивні особливості головних, допоміжних (ДК) та утилізаційних (УК) котлів суднових енергетичних установок (СЕУ), на їх економічні, екологічні і експлуатаційні показники. При спалюванні цих палив зростає швидкість низькотемпературної корозії (НТК) до 1,2 мм/рік низькотемпературних поверхонь нагріву (НТП) при температурах стінки  $t_{ст}$  нижче 140... 120 С, що істотно знижує їх надійність і довговічність, обмежує можливості зниження температури вихідних газів  $\vartheta_{вих}$  і, отже, підвищення ККД котлів та економії палива при експлуатації СЕУ.

Загальноновизнаним напрямом підвищення ефективності використання рідкого палива з погляду енергозбереження і захисту навколишнього середовища вважається спалювання важких мазутних палив у вигляді водопаливних емульсій (ВПЕ): при вмісті води до 10...20 % ККД котлів може навіть підвищуватися, із збільшенням вмісту води в емульсії до 30...50 % зменшується вміст токсичних компонентів ( $NO_x$ ,  $SO_x$ , СО, бенз(а)пірену). Але при цьому практично відсутні конкретні відомості про перебіг корозійних процесів на поверхнях нагріву котлів при використанні ВПЕ, а опубліковані нечисленні дані носять якісний характер. Це зумовило необхідність розробки науково-прикладної задачі підвищення надійності й довговічності суднових котлів і, отже, необхідність отримання кількісних даних щодо інтенсивності НТК низькотемпературних поверхонь нагріву при спалюванні ВПЕ, оскільки саме вони визначають не тільки надійність роботи котлів при глибокій утилізації димових газів, але й температуру вихідних газів, економічні показники та, як наслідок, ефективне використання палива і вторинних енергоресурсів СЕУ.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки України «Новітні технології і ресурсозбережні технології в енергетиці, промисловості і агропромисловому комплексі» (напрямок 6), Міжвузівської науково-технічної програми «Енергоресурси і енергозбереження на водному транспорті України» (розділ 55), науково-дослідної роботи № ДР 0102U05201, плану НДР обласної програми енергозбереження, затвердженій Херсонською обласною радою, рішення №320 від 12.12.2000 р. У цих роботах здобувач брав участь як виконавець.

**Мета наукового дослідження** - підвищення надійності, довговічності, ефективного використання енергоресурсів у суднових котлах при спалюванні ВПЕ за рахунок зниження інтенсивності низькотемпературної корозії при збільшенні вмісту водопаливних емульсій на основі результатів досліджень процесів у низькотемпературних поверхнях нагріву.

### **Основні завдання наукового дослідження:**

- дослідження і розробка способу підвищення надійності, довговічності та ефективності суднових котлів шляхом установа законності перебігу та швидкості НТК при спалюванні мазуту з коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1,01 \dots 1,5$  при різних температурах стінки  $t_{\text{ст}}$ , вмісті води в емульсії  $W^r$  і сірки  $S^r$  в початковому паливі;
- аналіз процесів, які можуть пояснити механізм НТК при спалюванні ВПЕ;
- оцінка токсичності димових газів при різних способах введення води в зону горіння і впливу поглинання оксидів азоту конденсатом на поверхні нагріву з  $t_{\text{ст}}$ , нижчою від температури точки роси (ТТР), на екологічні і корозійні властивості димових газів;
- розробка на основі проведених досліджень конструктивних і режимних заходів, що забезпечують постійність і навіть збільшення ККД котлів при спалюванні ВПЕ.

**Об'єктом дослідження** є процеси підвищення ефективності СЕУ при спалюванні водопаливних емульсій.

**Предмет дослідження** - процеси підвищення надійності, довговічності та ефективного використання енергоресурсів у суднових котлах при спалюванні ВПЕ.

**Методи дослідження** - експериментально-теоретичні: експериментальні дослідження втрати металу при  $t_{\text{ст}}$  НТП, нижчій від ТТР пари сірчаної кислоти; теоретичне обґрунтування прогнозування НТК на основі короткочасних експериментальних досліджень; теоретичне обґрунтування впливу зміни  $t_{\text{ст}}$  НТП і  $b$  на величину швидкості корозії; методи регресійного аналізу результатів корозійних досліджень; метод математичного планування експерименту; методи дослідження процесів та ефективності схемно-конструктивних рішень за допомогою ЕОМ. Задача оцінки ефективності котлів при спалюванні ВПЕ розв'язувалася на основі розробленої моделі, яка враховує взаємозв'язок теплотехнічних і теплохімічних процесів, шляхом зіставлення надійності, екологічних та економічних показників.

### **Наукові результати, що отримані в роботі:**

- уперше обґрунтована доцільність та експериментально підтверджена ефективність використання в котлах ВПЕ для підвищення довговічності і надійності суднових котлів за рахунок зниження корозійної активності димових газів;
- уперше одержані на основі експериментальних досліджень кількісні залежності швидкості НТК поверхонь нагріву суднових котлів від вмісту води у ВПЕ (2,0...30,0 %), вмісту сірки в початковому паливі ВПЕ (0,7...2,0 %), величини  $b$  (1,01... 1,5), при якій здійснювалося спалювання ВПЕ;
- встановлено переважний вплив вмісту води у ВПЕ на інтенсивність НТК поверхонь нагріву суднових котлів;
- одержані кількісні залежності швидкості НТК від  $t_{\text{ст}}$  у діапазоні 70...150 °С при вмісті води до 30 %;

- розроблена номограма для вибору необхідних значень  $\vartheta_{\text{вих}}$  і  $\alpha$ , які забезпечують підвищення надійності роботи НТП суднових котлів, постійність або навіть підвищення ККД котла, зниження емісії токсичних інгредієнтів при переході на спалювання ВПЕ;

- для режимів спалювання ВПЕ запропоновано використання спеціально спроектованих допоміжних та утилізаційних котлів

**Наукове положення**, яке виноситься на захист:

- доведена перспективність використання ВПЕ для підвищення надійності і довговічності суднових котлів за рахунок зниження інтенсивності НТК до 0,25...0,30 мм/рік при спалюванні ВПЕ з  $W^r$  близько 30 % та  $t_{\text{ст}}$  вище 70...80 °С, що забезпечує зростання ресурсу роботи металу низькотемпературних поверхонь котлів до 10 років, зниження  $\vartheta_{\text{вих}}$  до 90...110 °С, збільшення ККД ДК до 93% і глибини утилізації вихлопних газів після ДВЗ і ГТД до 65 % при сполученні режимних та конструктивних факторів, що встановлені в результаті проведених досліджень, сприяє ефективному використанню енергоресурсів при покращенні екологічних показників.

**Достовірність результатів досліджень** забезпечена коректністю постановки науково-прикладної задачі, застосуванням фізично і математично обґрунтованих методів розв'язання поставлених задач досліджень, узгодженням отриманих результатів досліджень на стенді з даними випробувань на діючих котлах при практично однакових умовах горіння, необхідною точністю аналізу запропонованих технічних рішень.

**Наукове значення** мають наступні результати досліджень:

- закономірності перебігу НТК поверхонь нагріву суднових котлів при спалюванні ВПЕ з  $S^r = 0,7...2,0$  % і  $W^r = 2,0...30,0$  % та  $\alpha = 1,01...1,5$ ;
- залежності швидкості корозії  $K = f(t_{\text{ст}})$  і  $K = f(W^r)$  при спалюванні різних палив і ВПЕ;

- залежності емісії  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , аерозолу сірчаної кислоти і загальної токсичності  $\Phi_{\Sigma}$  газів від вмісту води в емульсії.

Отримані результати можуть бути використані також і в стаціонарній енергетиці при спалюванні всіх видів органічного палива, нафтовмісних вод тощо.

**Практичну цінність** мають:

- розроблені науково обґрунтовані методики оцінки надійності і довговічності НТП суднових котлів на основі досліджень інтенсивності НТК що надає можливості встановлення ресурсу роботи металу, значень температури відхідних газів  $\vartheta_{\text{вих}}$  і, отже, ККД котлів;

- запропоновані конструктивно-схемні рішення котлів з розвиненими конвективними поверхнями нагріву, що спеціально спроектовані для спалювання ВПЕ з урахуванням зміни інтенсивності горіння, теплообміну і корозії з метою збереження або підвищення ККД

- номограма, яка побудована на основі отриманих результатів досліджень і надає можливість визначення ресурсу НТЦ максимальних значень ККД і мінімальних витрат палива, вмісту шкідливих речовин у газах та їх токсичності.

Результати експериментальних досліджень, методики розрахунку поверхонь нагріву суднових котлів та конструктивно-схемні рішення тешоутилізаційних контурів використані механічним відділом ЦКБ «Ізумруд» (м. Херсон) при проектуванні допоміжних енергетичних установок транспортних суден

Упровадження результатів досліджень відбувалось також і за планами обласної програми енергозбереження на виробничому підприємстві «Котломонтажналадка», на підприємстві «Теплотехніка».

Методики теплових розрахунків котлів при спалюванні ВПЕ та розроблений програмний комплекс використовуються в навчальному процесі НУК при дипломному і курсовому проектуванні

**Особистий внесок здобувача** полягає в розробці методики і проведенні експериментів, обробці та аналізі їх результатів; розробці комп'ютерної моделі і програм комплексу автоматизованого проектування котлів при спалюванні ВПЕ; проведенні комплексу розрахунків на ЕОМ, обробці та аналізі їх результатів.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу УДМТУ(НУК) (2002, 2004 рр.), 2-й та 4-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні» (Миколаїв, УДМТУ, 1998 р.; Миколаїв, НУК, 2005 р.), Міжнародних науково-технічних конференціях студентів, аспірантів, молодих учених та молодих спеціалістів «Сучасні проблеми суднової енергетики» (Миколаїв, УДМТУ, 2003 р.), «Суднова енергетика: стан та проблеми» Миколаїв, НУК, 2005 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека об'єктів господарської діяльності» (Миколаїв, МДГУ ім. П. Могили, 2004 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення» (Миколаїв, НУК, 2005 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 9 друкованих наукових робіт, зокрема 3 статті в наукових спеціалізованих виданнях (без співавторів 1), 6 тез доповідей (без співавторів 2).

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури і додатків. Загальний обсяг роботи становить 242 машинописні сторінки, серед яких 133 сторінки основного тексту, 90 рисунків, 16 таблиць, 21 сторінка списку літератури (228 найменувань) та 54 сторінки додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації і необхідність проведення досліджень низькотемпературних корозійних процесів при спалюванні ВПЕ, наведені дані про наукову новизну і практичне значення отриманих результатів досліджень, наведена загальна характеристика роботи.

У першому розділі виконано аналіз літературних даних стосовно техніко-економічних показників СЕУ. Він показав, що, при досягнутих в останні роки істотних зниженнях питомої витрати палива в ДВЗ та ГТД у ДК, витрати палива на які (особливо на танкерах) досягають практично половини витрати палива на головний двигун (ГД), не впроваджуються заходи, які забезпечують підвищення їх ККД що знаходиться на рівні 80...84%. Це обумовлено НТК інтенсивність якої обмежує  $\vartheta_{\text{вих}}$  на рівні 150... 180 °С. Розглянуто конструкції застосовуваних у даний час ДК і УК та заходи, що спрямовані на підвищення їх надійності і техніко-економічних показників. У топках ДК можливе спалювання нафтозалишків у вигляді ВПЕ (як вторинних енергоресурсів), кількість яких особливо суттєва при експлуатації танкерів

Проведений аналіз заходів, що спрямовані на зменшення вмісту токсичних речовин у димових газах котлів, ДВЗ, ГТД (особлива увага приділена термомеханічним методам - упорскуванню води і пари, використанню ВПЕ). Автори робіт, де приведені нечисленні відомості про якісну зміну характеру НТК при застосуванні згаданих заходів не пов'язують зниження інтенсивності забруднення і корозії зі зміною концентрації  $\text{NO}_x$ , і вмісту в них  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$ , в той час як від їх співвідношення в димових газах змінюється розчинність оксидів азоту в сірчаній кислоті, що може вплинути на інтенсивність корозії. Так, у сірчаноокислотному виробництві за нітрозним механізмом абсорбція оксидів азоту розчином сірчаної кислоти покращує умови служби сталевих апаратури, оскільки оксиди азоту, що містяться в кислоті, пасивують сталеві поверхні. Розглянуто основні закономірності НТК як електрохімічного процесу і проаналізовано вплив різних чинників на кінетику його розвитку.

Наведені дані про теплові втрати та ККД котлів. Під час спалювання ВПЕ спостерігається зростання ККД при  $W^r$  до 10...15 % (і навіть 20 %).

Усе це дозволило сформулювати основні завдання дослідження

**Другий** розділ присвячений опису та аналізу застосованих методів досліджень шляхів підвищення ефективності роботи суднових котлів, методик експериментальних досліджень. Для досягнення поставлених у роботі цілей з підвищення ефективності роботи котлів при спалюванні ВПЕ необхідне застосування аналітичних та експериментальних методів досліджень. Дослідження інтенсивності НТК проводилось на експериментальній установці (рис. 1), яка забезпечує постійність параметрів процесів, що дає можливість чітко і достовірно оцінити вплив складу палив і режимних чинників на швидкість корозії. Паливна система забезпечує подачу до пальника 1...3 кг/год мазуту або емульсії з в'язкістю 2,0.. 2,5° ВУ. Підготовка ВПЕ до спалювання здійснювалася в окремій установці Були проведені спеціальні дослідження якості і стабільності одержуваних емульсій, а також дисперсності при розпилюванні палива і ВПЕ ротаційними форсунками, що знаходилась на рівні 30...50 мкм.

Аналіз складу димових газів здійснювався за допомогою газоаналізаторів ГХП-3М, УГ-2, ОКСИ-5М, хроматографа «Газохром

1 – топка; 2 – пальник (ротаційна форсунка); 3 – система паливопідготовки;  
4 – газохід установки; 5, 6 – блок зразків для дослідження ВТК та НТК відповідно;  
7 – вентилятор; 8 – повітрянагрівач; 9 – ресивер повітря для охолодження зразків ВТК;  
10 – байпасні газоходи для дослідження кінетики НТК; 11 – термостати для охолодження зразків НТК; 12 – блок аналізу складу димових газів; 13, 14 – потенціометри контролю температури поверхні зразків ВТК та НТК відповідно; 15 – блок аналізу складу димових газів перед блоком зразків НТК і на виході з установки

Тривалість дослідів складала від 2 до 100 год. Збиток маси  $\Delta m$  зразка в цьому випадку внаслідок корозії був достатнім для визначення швидкості корозійного процесу з необхідною точністю до 10 %. Швидкість корозії  $K$ , г/(м<sup>2</sup> · год), поверхні металу  $F$ , м<sup>2</sup>, при певній температурі стінки трубки за час  $\tau$ , визначалась за формулою  $K = \Delta m / (F\tau)$ . Обробка результатів експериментальних досліджень здійснювалась за допомогою комп'ютерної універсальної статистичної графічної системи *STATGRAPHICS*.

Для оцінки впливу оксидів  $\text{NO}_x$  на інтенсивність НТК і з'ясування механізму цього процесу проводився аналіз складу конденсату на поверхні нагріву з  $t_{\text{ст}}$ , нижчою від ТТР. Масопотік кислоти до поверхні та її концентрація визначалися гравітаційним методом і шляхом титрування розчину. Вміст аерозолі сірчаної кислоти визначався шляхом його відбору на фільтр з пористого скла в області температур газів 200...300 °С.

Оптимізація параметрів роботи суднових котлів можлива на основі аналітичних досліджень їх ККД при  $\vartheta_{\text{вих}}$  і  $\alpha$  з урахуванням експериментальних та літературних даних щодо величини і зміни теплових втрат, інтенсивності теплообміну і корозійних процесів в елементах котлів. На основі взаємозв'язків між теплохімічними процесами під час горіння палив і ВПЕ при впровадженні заходів щодо зниження емісії шкідливих речовин, які впливають на корозійні властивості димових газів і на техніко-економічні показники котлів, побудована укрупнена модель процесів, що розглядаються як основа зіставлення надійності роботи, екологічних та економічних

показників котлів при спалюванні ВПЕ з різним вмістом сірки і води при зміні  $\alpha$  та  $\vartheta_{\text{вих}}$ .

У третьому розділі розглянуто вплив вмісту води в паливі або водяної пари, яка впорскується окремо в топку, на якість горіння (вміст  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) і токсичність димових газів (вміст  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ), яка визначає також їх корозійні властивості. Дослідження на експериментальній установці при спалюванні мазуту М40 ( $S^r = 1,8\%$ ,  $W^r = 2\%$ ) з  $\alpha = 1,5$ , при спалюванні ВПЕ на основі цього мазуту з  $W^r$ , що дорівнювала 15 і 30 %, і при введенні до кореня факела водяної пари на рівні  $W^r = 30\%$  показали, що вміст  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  і  $\text{CH}_4$  в димових газах при спалюванні ВПЕ і впорскуванні пари збільшується, але тільки в початковій фазі горіння. При цьому (особливо при спалюванні ВПЕ) поліпшується процес горіння, що приводить до зниження емісії продуктів неповного горіння і, отже, до зменшення теплових втрат. Концентрація  $\text{NO}_x$  знижується: при впорскуванні водяної пари на 14...30 %, при спалюванні ВПЕ із вмістом води до 30 % – в 3 рази, що пов'язано не тільки зі зниженням температури в топці, але і збільшенням вмісту  $\text{H}_2$  і  $\text{CO}$ , переважне окиснення яких знижує інтенсивність окиснення  $\text{N}_2$  через дефіцит атомарного кисню, що утворюється. Було встановлено, що при спалюванні ВПЕ у  $\text{NO}_x$  збільшується частка  $\text{NO}_2$ . Результати досліджень вмісту  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , аерозолі  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в потоці димових газів при збільшенні  $W^r$  в емульсії до 30% (рис. 9.а) показали, що вміст  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  зменшується, а аерозолі  $\text{H}_2\text{SO}_4$  зростає. Сумарна токсичність  $\Phi_\Sigma$  має мінімум при  $W^r \approx 25\%$ . Спеціальні дослідження на котлі Е-1/9, після якого був установлений конденсаційний економайзер, підтвердили отримані результати. За наявності конденсату на поверхні нагріву з температурою нижчою від ТТР, відбувається процес абсорбції  $\text{NO}_x$ , що приводить до зменшення його емісії в атмосферу в 1,4...2,6 рази залежно від навантаження котла і вмісту  $\text{CO}$  в димових газах. Зростання частки  $\text{NO}_2$  в суміші  $\text{NO}_x$  призводить до збільшення розчинності оксидів азоту в конденсаті на поверхні нагріву, що може змінити інтенсивність корозії металу.

У четвертому розділі наведені результати досліджень НТК при спалюванні ВПЕ і стандартних палив. Усього було проведено 25 серій дослідів при  $S^r = 0,7...2,0\%$ ,  $\alpha = 1,01...1,5$ ,  $W^r = 2,0...30,0\%$ . Було проведено 2 серії дослідів при впорскуванні води і пари в корінь факела в кількостях, що еквівалентні  $W^r = 30\%$ .

Дослідження кінетики НТК (за питомим збитком металу  $\Delta G$ ) при забезпеченні сталості параметрів процесів горіння і корозії дозволяють істотно скоротити тривалість трудомістких корозійних досліджень. Графіки і рівняння регресії, що одержані при обробці результатів експериментів двох режимів, наведені на рис. 2. Як показали дослідження, час стабілізації швидкості корозії (особливо при спалюванні ВПЕ) складає 2...4 год. Це дозволяє оцінити рівень корозійного процесу і прогнозувати його розвиток протягом 2...12 год.

На підставі залежностей  $\Delta G = f(\tau)$ , які одержані в області «кислотного» корозійного піка при  $t_{ст} = 105...115^\circ\text{C}$ , за даними 8-годинних дослідів були побудовані залежності збитку металу  $\Delta G$  від  $S^r$  і  $W^r$  в емульсії і величини  $\alpha$  (рис. 3). Незначне зростання  $\Delta G$  залежно від  $\alpha$  і  $S^r$ , зближення кривих

$\Delta G = f(W^r)$  при  $W^r = 30\%$  та різному вмісті сірки можна пояснити тільки створенням умов пасивації металу при цьому вмісті води в емульсії. При введенні в топку розпиленої води або водяної пари значення  $\Delta G$  вище, ніж при спалюванні ВПЕ. Вибір повного факторного ротатбельного плану (як одного з методів математичного моделювання) надав можливість оцінити сумісний вплив розглянутих трьох чинників на величину  $\Delta G$  (рис. 4). Найбільше впливає на величину  $\Delta G$  вміст води  $W^r$  у ВПЕ, потім  $\alpha$  і  $S^r$ . Графіки головних ефектів і взаємодій, контурний графік свідчать, що найменше значення  $\Delta G$  може бути при  $W^r = 30...35\%$ ,  $S^r \approx 1,35\%$  і  $\alpha = 1,25$ .

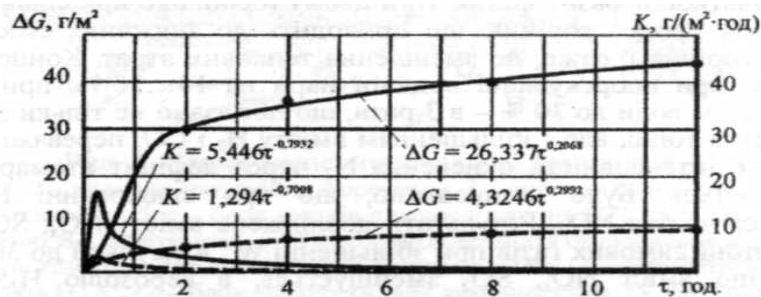


Рис. 2. Зміна збитку металу  $\Delta G$  та швидкості корозії  $K$  з часом:

— M40+Φ12 ( $W^r = 2\%$ ,  $S^r = 1,5\%$ ,  $\alpha = 1,35$ ,  $\tau = 8$  год);

- - - M40 ( $W^r = 30\%$ ,  $S^r = 1,8\%$ ,  $\alpha = 1,45$ ,  $\tau = 8$  год)

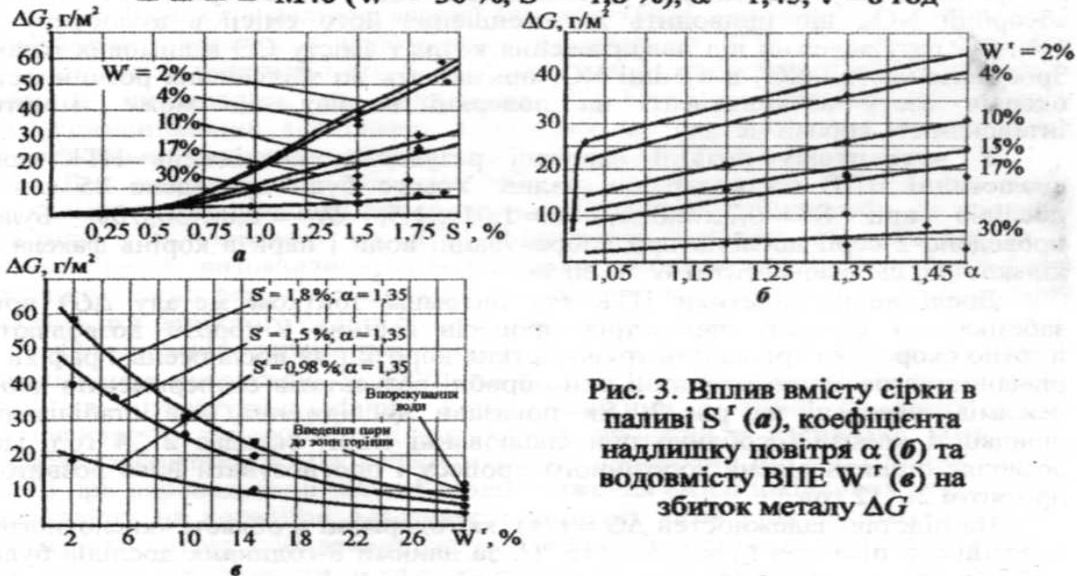


Рис. 3. Вплив вмісту сірки в паливі  $S^r$  (а), коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  (б) та водовмісту ВПЕ  $W^r$  (в) на збиток металу  $\Delta G$

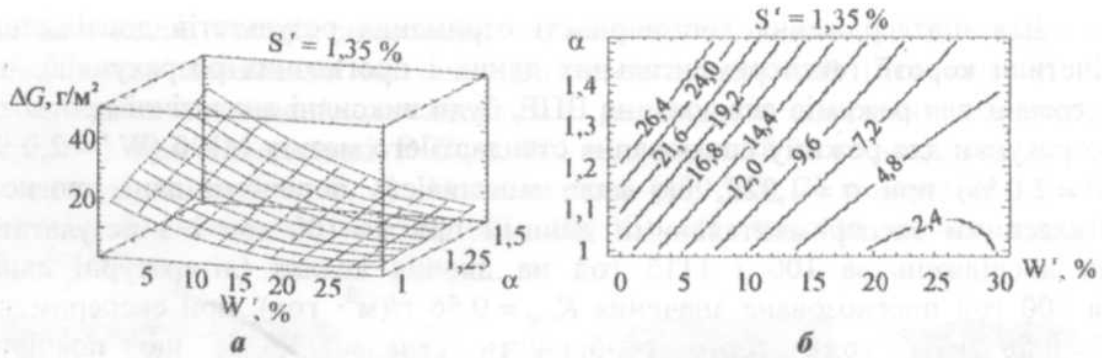


Рис. 4. Залежність збитку металу від коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$ , водовмісту  $W'$ , кількості сірки  $S'$ : **а** - поверхня відклику; **б** - ізолінії  $\Delta G$ ,  $\text{г/м}^2$ .  
Кількісна оцінка інтенсивності НТК проводилася за значеннями миттєвої швидкості корозії  $K_M = d(\Delta G)/d\tau = \rho_M d(\Delta \delta)/d\tau$  і середньої швидкості за проміжків часу  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ , яка визначається за формулою

$$K = K_{\text{сер}} = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} K_M d\tau = \frac{\Delta G_2 - \Delta G_1}{\tau_2 - \tau_1}.$$

Для оцінки достовірності одержаних регресійних рівнянь, що прогнозують процес корозії, порівняння швидкостей корозії, а також впливу накопиченого шару продуктів корозії і сталої пасивації поверхні металу були проведені дослідження НТК при  $\tau = 100$  год. Одержані залежності  $K = f(t_{\text{ст}})$  (рис. 5) показують, що зі зменшенням  $\alpha$  швидкість корозії (особливо в області «кислотного піка» при  $t_{\text{ст}} = 105 \dots 115$  °C) знижується. При спалюванні ВПЕ з  $W' = 30\%$  і підвищеному  $\alpha$  (1,45) швидкості корозії в 1,5 разу нижчі, ніж при  $\alpha = 1,01$  та практично відсутньому «піку» корозії.

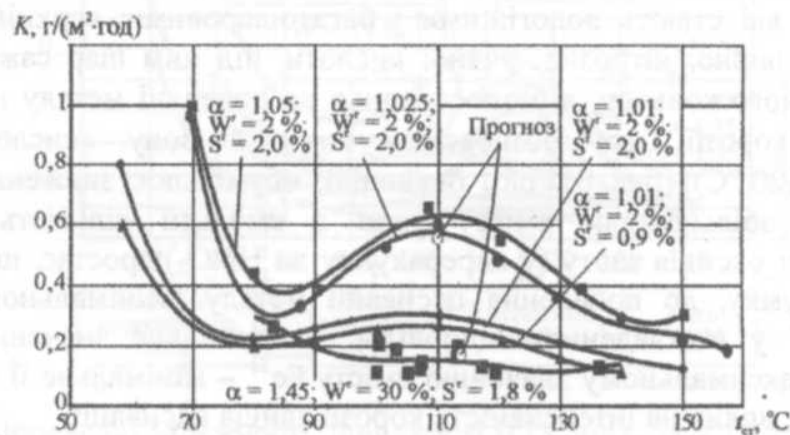


Рис. 5. Залежність швидкості корозії  $K$  від температури стінки  $t_{\text{ст}}$

Для режиму спалювання ВПЕ при  $W' = 30\%$ ,  $S' = 1.8\%$ ,  $\alpha = 1.45$  одержане прогнозоване значення середньої швидкості корозії за 88 год експерименту складає  $0,181 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год)}$  (дані експерименту  $0,178 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год)}$  при  $t_{\text{ст}} = 110$  °C, тобто розбіжність становить до 2 %).

Для підтвердження достовірності отриманих результатів дослідження кінетики корозії (експериментальних даних і прогнозних розрахунків), що одержані для режимів спалювання ВПЕ, були виконані аналогічні прогнозні розрахунки для режиму спалювання стандартного мазуту М100 ( $W^r = 2,0 \%$ ,  $S^r = 2,0 \%$ ) при  $\alpha = 1,025$ , що дало можливість порівняти дані прогнозу з власними експериментальними даними при  $\tau = 100$  год і з результатами досліджень за 100 і 1115 год на діючих котлах (літературні дані). За 100 год прогнозоване значення  $K_{\text{сер}} = 0,56 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год)}$ , при експерименті  $K = 0,58 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год)}$ , тобто розбіжність складає 3,6 %, що повністю узгоджується з літературними даними. Це свідчить про достовірність отриманих на експериментальній установці результатів корозійних досліджень і результатів прогнозних розрахунків при спалюванні ВПЕ.

Для отримання порівняльних характеристик і з'ясування механізму НТК були проведені комплексні дослідження при спалюванні ВПЕ і стандартного мазуту з  $W^r$ , що дорівнюють 2, 10, 15, 17 %;  $S^r = 1,5 \dots 2,0 \%$  і  $\alpha = 1,03 \dots 1,5$  при  $\tau = 6 \dots 8$  год, які показали, що швидкість корозії  $K$  при спалюванні ВПЕ істотно знижується (в області «кислотного піка» в 1,8 разу при  $\tau \approx 8$  год і в 5 разів при  $\tau \approx 100$  год через утворення малопроникної для кислоти плівки сульфатів і досягнення сталого рівня пасивації) і знаходиться на рівні, який досягається при спалюванні стандартного мазуту з мінімальними  $\alpha (1,03 \dots 1,04)$  (літературні дані); загальні масопотоки сірчаної кислоти при спалюванні ВПЕ і стандартного палива практично рівні, а кількість  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , що залишилася на поверхні, при спалюванні ВПЕ більша (внаслідок зниження швидкості корозії). При спалюванні емульсії змінюється характер відкладень, які стають вологішими і багатошаровими: верхній шар сірого кольору, імовірно, нітрозилсірчаної кислоти, під ним шар сажі і продуктів корозії чорного кольору, а безпосередньо на поверхні металу щільна плівка продуктів корозії, яка розповсюджується в зону «кислотного піка» ( $t_{\text{ст}} = 100 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (рис. 6), що, очевидно, обумовлює зниження швидкості корозії. Із збільшенням вмісту води в емульсії кількість поглинених конденсатом оксидів азоту (у перерахунку на  $\text{HNO}_3$ ) зростає, що приводить, на нашу думку, до посилення пасивації металу. Мінімуму значенню вмісту  $\text{Fe}^{3+}$  у відкладеннях відповідає максимальне значення швидкості корозії, а максимальному значенню вмісту  $\text{Fe}^{3+}$  – мінімальне її значення, що підтверджує вплив на інтенсивність корозії явища пасивації.

За даними досліджень (з урахуванням результатів 100-годинних дослідів та аналітичних досліджень впливу змінних значень  $\alpha$  і  $t_{\text{ст}}$ ) були побудовані залежності  $K = f(t_{\text{ст}})$  при  $\tau = 1000$  год (рис. 7), які показують, що при спалюванні ВПЕ з  $W^r = 30 \%$  за різних режимів ( $\alpha = 1,15 \dots 1,45$ ) і  $S^r$  до 2,0 % у межах  $t_{\text{ст}} = 70 \dots 140 \text{ }^\circ\text{C}$  швидкість корозії знаходиться на рівні 0,2 мм/рік і її

значення менше, ніж при спалюванні необхідного палива навіть за низьких  $\alpha$ , і при цьому практично не спостерігається «кислотний пік» корозії. За результатами проведених досліджень і розрахунків одержані залежності  $K=f(W^r)$  при спалюванні ВПЕ з  $W^r$  від 4 до 30 % в чотирьох зонах температур стінки (рис. 9, б): 1) точки роси (130 °C); 2) «кислотного піка» (115 °C); 3) мінімуму корозії (80...100 °C); 4) другого «піка» корозії (60...70 °C).



Рис. 6. Зовнішній вигляд відкладень при різних режимах спалювання:

на трубах після дослідів:

а - ВПЕ ( $W^r = 30\%$ ),  $\tau = 88$  год; б - М40  $W^r = 2\%$ ;

змиву відкладень на фільтрі: в - ВПЕ ( $W^r = 30\%$ ),  $\tau = 88$  год (фрагменти плівки сульфатів); г - при спалюванні М40 ( $W^r = 2\%$ ), розсип відкладень;

на зразку після двох тижнів зберігання при спалюванні ВПЕ:

(д): 1 - щільний шар сульфатів; 2 - відкладення, що відшаровуються



Рис. 7. Прогнозні залежності швидкості НТК від  $t_{ст}$  ( $\tau = 1000$  год)

За даними залежностей  $K=f(t_{ст})$  і  $K=f(W^r)$  при  $\tau = 1000$  год з'являється можливість визначити вміст  $W^r$  в емульсії, при якому забезпечується прийняте допустиме значення швидкості корозії  $K_{доп}$  в області «кислотного піка», а також мінімальну  $t_{ст}^{мін}$  в області другого «піка» корозії, при якій

забезпечується прийняте  $K_{\text{доп}}$ . Завдяки переважному і протилежному (в порівнянні з  $\alpha$ ) впливу вмісту  $W^r$  у ВПЕ, є можливість, збільшуючи  $W^r$  в емульсії до 30 %, знизити швидкість корозії. Спалювання ВПЕ з  $W^r = 30$  % дозволить також понизити вимоги до регулювання процесу горіння в судових ДК в широких межах, оскільки швидкість НТК знаходиться в допустимих межах навіть при високих  $\alpha$ , і зменшити  $\vartheta_{\text{вих}}$ , що може компенсувати зниження ККД котлів при спалюванні ВПЕ з великим водовмістом.

У п'ятому розділі розглянуто шляхи підвищення ефективності роботи котлів і СЕУ при спалюванні ВПЕ з різним вмістом  $W^r$ . Для визначення раціонального водовмісту ВПЕ необхідно враховувати зміну характеру всіх процесів у котлах (горіння, теплохімічні явища і теплообмін у газоходах), а не тільки збільшення втрат теплоти  $q_{\text{вип}}$  на випаровування води і втрати  $q_p$  при  $\vartheta_{\text{вих}} > 100$  °С. При спалюванні емульсій відбувається збільшення теплових втрат ( $\Delta q = q_{\text{вип}} + q_p + \Delta q_2$ ), і тому для збереження і збільшення ККД необхідно забезпечити умови, щоб  $\Delta q \leq 0$ , що можливо при зменшенні значень не тільки  $\alpha$ , але і  $\vartheta_{\text{вих}}$  в зв'язку зі зниженням інтенсивності НТК. Проведені аналітичні дослідження дозволили одержати аналітичні залежності для визначення температури  $\vartheta_{\text{вих}}$  і мінімального значення  $\alpha$  при спалюванні ВПЕ, які забезпечують цю умову. Одержані залежності впливу  $\alpha$  і  $\vartheta_{\text{вих}}$  на величини теплових втрат при збільшенні  $W^r$ , які надають можливість визначити умови збереження ККД і навіть його підвищення при спалюванні ВПЕ.

Проведено розрахункове дослідження техніко-економічних показників ДК з економайзером і газовим повітропідігрівником (ГПП) та УК трьох тисків. При спалюванні ВПЕ в котлі, спроектованому спеціально для спалювання ВПЕ з більшими розмірами поверхонь нагріву, з'являється можливість істотно підвищити ККД котла при  $W^r$  більше 10 % за рахунок зменшення  $\vartheta_{\text{вих}}$  при одночасному підвищенні надійності роботи поверхонь нагріву внаслідок зниження НТК. На ЕОМ були проведені розрахунки теплових балансів ДК. З урахуванням втрат  $q_2$ ,  $q_{\text{вип}}$ ,  $q_p$  і власних експериментальних значень  $q_3$ ,  $q_4$  залежно від  $W^r$  в емульсії значення ККД котлів при  $\vartheta_{\text{вих}} 110 \dots 170$  °С тільки через зменшення втрат  $q_3$  і  $q_4$  зростають при збільшенні  $W^r$  в емульсії до 10 % (рис. 8).

При одночасному зменшенні  $\alpha$  і  $\vartheta_{\text{вих}}$  можливості збереження і навіть збільшення ККД розширюються. Критерієм вибору оптимальної температури  $\vartheta_{\text{вих}}$  у процесі розрахунків ДК з ГПП був прийнятий мінімум розрахункових річних витрат, при визначенні яких ураховувалася вартість частини поверхні ГПП, схильної до корозії, величина якої змінюється залежно від розподілу

температур металу і газів (оптимальна  $\vartheta_{\text{вих}}$  при спалюванні ВПЕ з  $W' = 20\%$  складає  $105^\circ\text{C}$ ).

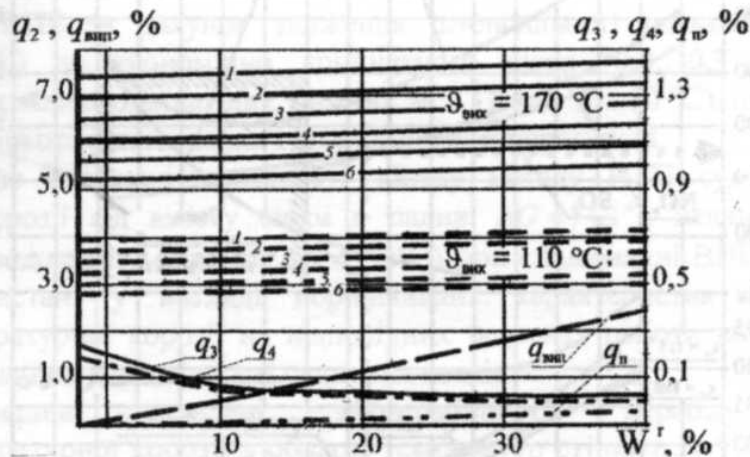


Рис. 8. Залежність теплових втрат  $q_2, q_3, q_4, q_5, q_n$  і  $q_{\text{вих}}$  від водовмісту ВПЕ  $W'$  при різних  $\alpha$  і  $\vartheta_{\text{вих}}$ :

1 –  $\alpha = 1,5$ ; 2 –  $\alpha = 1,4$ ; 3 –  $\alpha = 1,3$ ; 4 –  $\alpha = 1,2$ ; 5 –  $\alpha = 1,1$ ; 6 –  $\alpha = 1,01$ .

У зв'язку з можливістю при спалюванні ВПЕ підводити до економайзера котла живильну воду з температурою  $70\ldots 80^\circ\text{C}$  (завдяки зниженню НТК) рекомендується в утилізаційних контурах ДВЗ і ГТД передбачати підведення води з теплого ящика безпосередньо на вхід економайзера УК. Це дає можливість знизити  $\vartheta_{\text{вих}}$  на виході з УК зі  $160$  до  $90\ldots 110^\circ\text{C}$ , що забезпечує збільшення глибини утилізації з  $35$  до  $60\ldots 65\%$  залежно від сумарною  $a$  ДВЗ або ГТД.

Можливість зниження  $\vartheta_{\text{вих}}$  до  $90\ldots 110^\circ\text{C}$  унаслідок зниження інтенсивності НТК дозволяє істотно (до  $93\%$ ) підвищити ККД ДК без проведення спеціальних заходів щодо захисту НТП від корозії. Збільшення паропроодуктивності УК забезпечить додаткову економію палива в ходових режимах суден. На танкерах з урахуванням використання нафтозалишків у вигляді ВПЕ робота ДК практично повністю забезпечується за рахунок власних енергоресурсів судна.

На основі одержаних у результаті досліджень залежностей швидкості корозії, емісії шкідливих речовин і токсичності димових газів, значень теплових втрат, ККД і витрат палива від  $XV'$  в емульсії, що спалюється при різних  $b$  і  $\vartheta_{\text{вих}}$ , побудована номограма (рис. 9), яка пов'язує між собою швидкість корозії при заданому водовмісті емульсії та екологічні й економічні показники, що дозволяє оптимізувати роботу котлів у комплексі СЕУ.

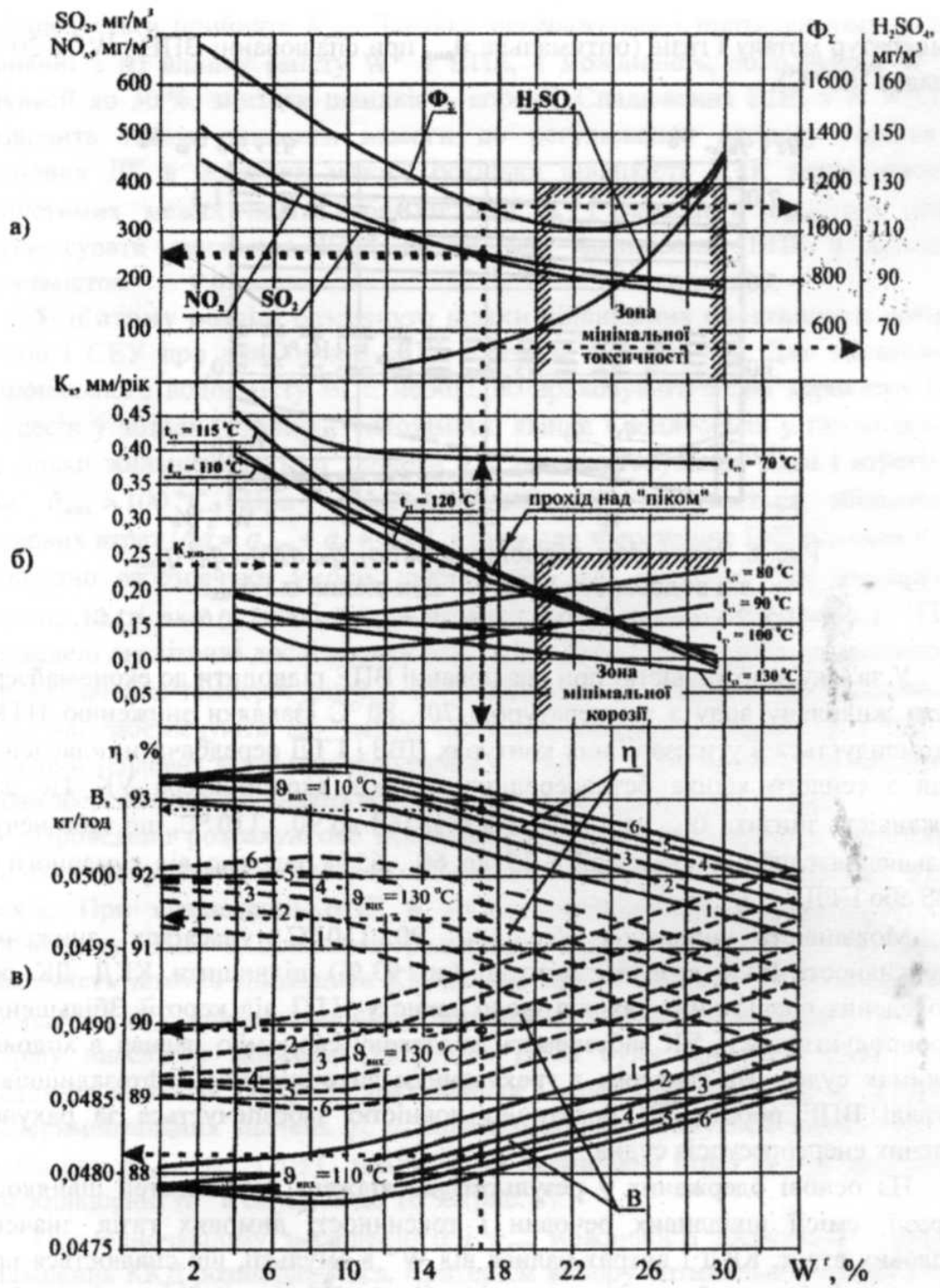


Рис. 9. Номограма для вибору ефективного режиму роботи котла:

а - екологічні показники; б - надійність (швидкість корозії);

в - економічні показники (ККД  $\eta$  і витрата палива  $B$ ):

1 -  $\alpha = 1,5$ ; 2 -  $\alpha = 1,4$ ; 3 -  $\alpha = 1,3$ ; 4 -  $\alpha = 1,2$ ; 5 -  $\alpha = 1,1$ ; 6 -  $\alpha = 1,01$

## ВИСНОВКИ

1. Отримано рішення важливої для суднової енергетики науково-прикладної задачі підвищення надійності і довговічності суднових котлів при спалюванні ВПЕ за рахунок зниження інтенсивності низькотемпературної корозії (НТК) до економічно прийнятного рівня (0,2...0,3 мм/рік) при температурах поверхонь нагріву, нижчих за ТТР (до 70...80 °С), що забезпечує комплексне використання палив і вторинних енергоресурсів

2. Уперше одержані залежності збитку металу Hill суднових котлів унаслідок корозії від вмісту сірки в паливі  $\Delta G = f(S')$ , надлишку повітря  $\Delta G = f(\alpha)$  і водовмісту емульсії  $\Delta G = f(W')$  при спалюванні ВПЕ, які можуть бути використані у вигляді порівняльних характеристик інтенсивності низькотемпературної корозії на відповідних режимах роботи котлів, а також для прогнозування довговічності суднових котлів

3. Уперше виявлені закономірності перебігу процесів низькотемпературної корозії в області температур стінки  $t_{ст} = 70...150$  °С при спалюванні ВПЕ з водовмістом  $W'$  до 30 % при різних режимах: коефіцієнтах надлишку повітря  $\alpha = 1,15...1,45$  і вмісту сірки  $S'$  в паливі до 2,0 %, які показують, що швидкість корозії майже в 5 разів нижча, ніж при спалюванні необводненого палива навіть при низьких надлишках повітря, при практично відсутньому "кислотному піку" корозії.

4. Отримані залежності швидкості корозії від температури стінки  $K = f(t_{ст})$  при  $\phi = 100$  год практично характеризують реальну інтенсивність корозійних процесів при експлуатації котлів між періодами очищеннями, а отже і термін служби суднових котлів. Установлено, що середнє значення швидкості корозії  $K_{сеп}$  при спалюванні ВПЕ з водовмістом  $W' = 30$  % і підвищеному значенні  $\alpha (1,45)$  в 1,5 разу нижче від  $K_{сеп}$  при  $\alpha = 1,01$  у разі спалювання не обводненого палива.

5. При спалюванні ВПЕ з  $W'$  близько 30 % навіть з підвищеними  $\alpha$  при зниженні температури стінки до 70...80 °С досягаються зменшення рівня забруднення навколишнього середовища, підвищення надійності роботи котлів, збільшення міжремонтного періоду, зниження витрат на ремонт низькотемпературних поверхонь нагріву, зниження вимог до регулювання величини  $\alpha$  в автоматичі горіння.

6. Побудована на підставі узагальнення результатів експериментальних та аналітичних досліджень номограма, яка пов'язує швидкість корозії при використанні ВПЕ та екологічні й економічні показники, спрямована на розробку режимних карт для організації оптимальних режимів експлуатації суднових котлів, а також на використання при їх проектуванні

7. Розроблено раціональні схемні рішення УК і ВК Установлено, що спалювання обводненого палива необхідно проводити в спеціально

проектованих під його використання котлах з урахуванням зниження швидкості НТК, зменшення температури вихідних газів  $\vartheta_{\text{вих}}$  і  $\alpha$ , посилення інтенсивності теплообміну, що розширює можливості збереження і навіть збільшення ККД (до 93 % при вмісті води у ВПЕ до 40 %).

8. Розроблені наукові основи методики оцінки надійності НТП за результатами досліджень інтенсивності НТК, які дають можливість установа ресурсу роботи металу, значення температури вихідних газів і ККД котлів.

9. Використання нафтозалишків і відходів підготовки палива у вигляді ВПЕ, економія палива при спалюванні ВПЕ у ГД і ДК, можливість зменшення  $\vartheta_{\text{вих}}$  внаслідок зниження інтенсивності НТК і відповідно істотне підвищення ККД ДК, збільшення глибини утилізації вихлопних газів до 65 % дозволяють практично повністю забезпечити роботу ДК танкерів протягом рейсу за рахунок власних енергоресурсів.

10. Отримані результати можуть бути використані також і в стаціонарній енергетиці при спалюванні всіх видів органічного палива, нафтовмісних вод тощо.

#### **Основні результати дисертації, опубліковані у наукових спеціалізованих виданнях:**

1. Горбов В.М., Горячкин А.В. Исследование интенсивности коррозионных процессов при сжигании водомазутных эмульсий // 36. наук, праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 2003. - № 5(391). - С. 87-95.

2. Горячкин А.В. Влияние содержания влаги в зоне горения на эмиссию оксидов азота и серы // Наук, праці: Наук.-метод. журнал. - Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. П. Могили, 2004. - Т. 31, вип. 18, Техногенна безпека. - С.27-38.

3. Горбов В.М., Горячкин А.В. Влияние состава и содержания оксидов азота и серы в газах на процессы в элементах ГТУ // Наук, праці: Науково-методичний журнал. Техногенна безпека. - Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. П. Могили, 2005. - Т.43, вип.30. - С. 119-127.

#### **Основні публікації, в яких додатково викладено зміст дисертації:**

4. Горбов В.М., Горячкин А.В. Утилизация теплоты дымовых газов при сжигании водотопливных эмульсий // Проблемы энергосбережения и экологии в судостроении: Тез. докл. 2-й Междунар. науч.-техн. конф. - Николаев: УГМТУ, 1998. - С. 20-21.

5. Горячкин А.В. Влияние состава оксидов азота на процессы в элементах ГТУ // Сучасні проблеми суднової енергетики: Матер. Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, молодих учених та молодих спеціалістів. - Миколаїв: УДМТУ, 2003. - С. 98-100.

6. Горбов В.М., Горячкин А.В. Шляхи підвищення екологічних та економічних показників котлів при спалюванні водопаливних емульсій // Екологічна безпека об'єктів господарської діяльності: Тези допов. до

Міжнар. наук.-практ. конф. - Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. П. Могили, 2004. -С. 81-83.

7. *Горячкин А.В.* Исследование кинетики низкотемпературных коррозионных процессов при сжигании водомазутных эмульсий // Суднова енергетика: стан та проблеми: Матер. Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, молодих учених та молодих спеціалістів. - Миколаїв: НУК, 2005. - С. 93-94.

8. *Горбов В.М., Горячкин А.В.* Повышение экономических, экологических характеристик и надежности работы котлов при сжигании водомазутных эмульсий // Матер. Міжнар. наук.-техн. конференції "Муниципальная энергетика: проблемы, решения". - Миколаїв: НУК, 2005. - С. 57-61.

9. *Горбов В.М., Горячкин А.В.* О повышении КПД вспомогательных котлов при сжигании водомазутных эмульсий // Матер. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. "Проблемы экологии и энергосбережения в судостроении". - Николаев: НУК, 2005. - С. 275-277.

**Особистий внесок здобувача в роботах, які опубліковані в співавторстві:** [1] - проведення досліджень корозійних процесів та обробка їх результатів; [3] - проведення експериментів, обробка їх результатів; [4] - знаходження взаємозв'язку зниження швидкості корозії і глибини утилізації; [6] - розробка конструктивних схем допоміжних та утилізаційних котлів і розрахунки їх теплових балансів при спалюванні ВПЕ; [8] - розробка критерію оптимального водовмісту ВПЕ з позицій еколого-економічної ефективності їх спалювання; [9] - розгляд чинників, що визначають ККД котлів при спалюванні ВПЕ.

## АНОТАЦІЯ

**Горячкін А.В.** Підвищення ефективності суднових котлів при спалюванні водоналивних емульсій. - Рукопис.

**Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.05 - суднові енергетичні установки. - Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2007.**

Дослідження, проведені на основі запропонованої моделі теплотехнічних і термохімічних процесів, показують, що спалювання ВПЕ з водовмістом  $W^r$  близько 30 % надає можливість одночасно вирішувати задачі підвищення надійності роботи суднових котлів, захисту навколишнього середовища, забезпечення енергозбереження при спалюванні важких залишкових палив, що підтверджується результатами експериментальних та аналітичних досліджень. Збільшення частки  $\text{NO}_2$  в  $\text{NO}_x$  до 33 % при спалюванні ВПЕ сприяє зростанню розчинності оксидів азоту в конденсаті сірчаної кислоти на поверхні, що приводить до зниження інтенсивності НТК. Експериментально отримані залежності збитку металу від вмісту сірки  $\Delta G = f(S^r)$ , надлишку повітря  $\Delta G = f(b)$ , водовмісту емульсії  $\Delta G = f(W^r)$ , а також залежності швидкості корозії від

температури стінки  $K=f(t_{ст})$  і вмісту води у ВПЕ  $K=f(W^r)$ . В області температур стінки 70... 150 °С при спалюванні ВПЕ з водовмістом  $W^r = 30$  % за різних режимів ( $\delta = 1,15... 1,45$ ) і вмісту сірки  $S^r$  до 2,0 % швидкість корозії нижча, ніж при спалюванні необводненого палива навіть при низьких  $\delta$  та практично відсутньому «кислотному піку» кірозії.

На основі отриманих результатів побудовано номограму, яка надає можливість визначення надійності і довговічності (ресурсу) НТП, максимальних значень ККД судових котлів і мінімальних витрат палива вмісту шкідливих речовин у газах та їх токсичності. Вона може бути покладена в основу розробки режимних карт для організації оптимальних режимів експлуатації котлів і використана при проектуванні котлів.

Зниження інтенсивності НТК при спалюванні ВПЕ дозволяє підвищити ККД ДК до 93 %, глибину утилізації - до 65 %, забезпечити роботу ДК танкерів протягом рейсу за рахунок власних енергоресурсів судна.

**Ключові слова:** суднова енергетична установка, допоміжний та утилізаційний котли, водопаливна емульсія, низькотемпературна корозія, надійність і довговічність, зниження токсичності, підвищення ККД.

## АННОТАЦИЯ

**Горячкин А.В. Повышение эффективности судовых котлов при сжигании водотопливных эмульсий. - Рукопись.**

**Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.05 - судовые энергетические установки. -Национальный университет кораблестроения имени адмирала**

Поставленные в работе цели поиска возможностей повышения эффективности работы котлов при сжигании ВТЭ достигнуты благодаря применению экспериментальных и аналитических методов проведения исследований. Эффективность горения ВТЭ возможно оценить только путем проведения экспериментальных исследований по содержанию  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ , уровню эмиссии  $NO_x$  и  $SO_x$ , интенсивности низкотемпературных коррозионных процессов. Проведение исследований на экспериментальной установке, на которой обеспечивается постоянство параметров процессов, дает возможность четко и достоверно оценить влияние состава топлив и режимных факторов на горение и скорость коррозионных процессов.

Исследования при сжигании ВТЭ с водосодержанием  $W^r$ , равным 15 и 30 % и при вводе водяных паров к корню факела на уровне  $W^r = 30$  % показали, что улучшается процесс горения, снижается эмиссия продуктов неполного горения, и, следовательно, уменьшаются тепловые потери. При увеличении  $W^r$  в эмульсии до 30 % содержание  $NO_x$  и  $SO_2$  уменьшается, а аэрозоля  $H_2SO_4$  растет. Суммарная токсичность  $\Phi_\Sigma$  имеет минимум при  $W^r \approx 25$  %. Концентрация  $NO_x$  снижается: при впрыске водяного пара на 14...29%, при сжигании ВТЭ с содержанием воды до 30 % – в 3 раза. При сжигании ВТЭ доля  $NO_2$  в  $NO_x$  увеличивается до 33 %. Рост доли  $NO_2$  в смеси  $NO_x$  приводит к увеличению растворимости оксидов азота в конденсате на поверхности нагрева, что может изменить интенсивность коррозии металла.

Проведено 25 серий опытов при содержании серы  $S^r$  от 0,7 до 2,0 %, при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$  от 1,01 до 1,5, при водосодержании эмульсии  $W^r$  от 2,0 до 30,0 %, 2 серии опытов при впрыске воды и пара в корень факела в количествах, эквивалентных  $W^r = 30$  %. Как показали исследования кинетики НТК (по удельной убыли металла  $\Delta G$ ) время стабилизации скорости коррозии (особенно при сжигании ВТЭ) составляет 2...4 ч, что позволяет оценить уровень коррозионного процесса и прогнозировать его развитие по результатам исследований в течение 2...12 ч.

Для оценки достоверности полученных регрессионных уравнений

кинетики коррозионного процесса проведены исследования НТК при  $\tau = 100$  ч, которые подтвердили результаты прогноза развития НТК и позволили достоверно оценить скорость коррозии при  $\tau = 1000$  ч.

Получены зависимости  $\Delta G$  от  $S^r$  и  $W^r$  в эмульсии и величины  $\alpha$ . Незначительный рост  $\Delta G$  при  $W^r = 30\%$  в зависимости от  $\alpha$  и  $S^r$ , сближение кривых  $\Delta G = f(W^r)$  при разном содержании серы можно объяснить только созданием условий пассивации металла.

Полученные зависимости скорости коррозионных процессов от температуры стенки  $K = f(t_{ст})$  показывают, что с уменьшением  $\alpha$  скорость коррозии (особенно в области «кислотного пика» при  $t_{ст} = 105...115^\circ\text{C}$ ) снижается. В то же время при сжигании ВТЭ с  $W^r = 30\%$  и повышенном  $\alpha$  (1,45) скорость коррозии в 1,5 раза ниже, чем при сжигании необводненного топлива даже с  $\alpha = 1,01$ , при практически отсутствующем «пике» коррозии.

Комплексные исследования при сжигании ВТЭ и стандартного мазута с  $W^r$ , равными 2, 10, 15, 17 %;  $S^r = 1,5...2,0\%$  и  $\alpha = 1,03...1,5$  при  $\tau = 6...8$  ч показали следующее: скорость коррозии  $K$  при сжигании ВТЭ существенно снижается (в области «кислотного пика» в 1,8 раза при  $\tau \approx 8$  ч и в 5 раз при  $\tau \approx 100$  ч из-за образования малопроницаемой для кислоты пленки сульфатов и пассивации) и находится на уровне  $K$  при сжигании стандартного мазута с минимальными  $\alpha$  (1,03...1,04); общие массопотоки серной кислоты, определяемые по сумме оставшегося количества и прореагировавшей кислоты, при сжигании ВТЭ и стандартного топлива практически равны. Количество оставшейся на поверхности  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при сжигании ВТЭ больше (вследствие снижения скорости коррозии). С увеличением содержания воды в эмульсии количество поглощенных конденсатом оксидов азота (в пересчете на  $\text{HNO}_3$ ) растет, что приводит к усилению пассивации.

По данным зависимостей  $K = f(t_{ст})$  и  $K = f(W^r)$  при  $\tau = 1000$  ч предоставляется возможность определить содержание  $W^r$  в эмульсии, при котором обеспечивается принятое допустимое значение скорости коррозии  $K_{доп}$  в области «кислотного пика», а также минимальную температуру стенки  $t_{ст}^{мин}$  в области второго «пика» коррозии, при которой обеспечивается принятое  $K_{доп}$ . Сжигание ВТЭ с  $W^r = 30\%$  позволит снизить требования к регулированию процесса горения в судовых ВК в широких пределах изменения  $\alpha$ , так как скорость коррозии находится в допустимых пределах даже при высоких  $\alpha$ , и снизить  $\vartheta_{yx}$ , что может компенсировать снижение КПД котлов при сжигании ВТЭ с большим  $W^r$ .

Для сохранения и увеличения КПД необходимо обеспечить условия, чтобы рост тепловых потерь при сжигании ВТЭ  $\Delta q \leq 0$ , что возможно при уменьшении значений не только  $\alpha$ , но и  $\vartheta_{yx}$ . Аналитические исследования позволили получить зависимости влияния  $\alpha$  и  $\vartheta_{yx}$  при увеличении  $W^r$  на величины тепловых потерь, которые предоставляют возможность определить условия сохранения величины КПД и даже его увеличения при сжигании ВТЭ.

Рекомендуется использование в утилизационных контурах ДВС и ГТД схем, предусматривающих подвод воды из теплого ящика с температурой  $70...80^\circ\text{C}$  прямо на вход экономайзера УК.

Возможность снижения  $\vartheta_{yx}$  до  $90...110^\circ\text{C}$  вследствие снижения

интенсивности НТК позволяет существенно повысить КПД ВК (до 93%) без проведения специальных мероприятий по защите НТП от коррозии, увеличить глубину утилизации выхлопных газов с 35 до 60...65 %. Увеличение паропроизводительности УК обеспечит дополнительную экономию топлива на ходовых режимах судов. На танкерах с учетом использования нефтеостатков в виде ВТЭ (в качестве вторичных энергоресурсов) работа ВК практически полностью обеспечивается за счет собственных энергоресурсов судна

На основе полученных в результате исследований зависимостей скорости коррозии, эмиссии вредных веществ и токсичности дымовых газов, значений тепловых потерь, КПД и расходов топлива от  $W^r$  в эмульсии, сжигаемой при разных  $\alpha$  и  $\vartheta_{yx}$ , построена номограмма, которая увязывает между собой указанные показатели, что позволяет повысить эффективность работы котлов в комплексе СЭУ.

**Ключевые слова:** судовая энергетическая установка, вспомогательный и утилизационный котлы, водотопливная эмульсия, низкотемпературная коррозия, надежность и долговечность, снижение токсичности, повышение КПД.

## SUMMARY

**Goryachkin A.V. Increase of efficiency of ships boilers at incineration of water-fuel emulsions. - Manuscript.**

**The dissertation for the scientific degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.08.05 - marine propulsion plants. - National University of Shipbuilding named after admiral Makarov, Mikolayiv, 2007.**

The researches conducted on the basis of the offered mathematical model show that incineration of WFE with  $W^r$  about 30 % gives possibility simultaneously to decide the tasks of defence of environment, increase of reliability of work, providing of energy-savings at incineration of heavy remaining fuels, that is confirmed by the results of experimental and analytical researches. Multiplying the stake of  $NO_2$  in  $NO_x$  to 33 % at incineration of WFE results in multiplying solubility of oxides of nitrogen in the runback of sulfuric acid on-the-spot, that results in the decline of LTC. Dependences of decrease of metal  $\Delta G$  are

experimentally  $\Delta G = f(S^r)$ ,  $\Delta G = f(\alpha)$ ,  $\Delta G = f(W^r)$ , and also dependences on speed of corrosion on the temperature of wall to  $K = f(t_{ct})$  and maintenances of water in WFE to  $K = f(W^r)$ . In area of temperatures of wall 70...150°C at incineration of WFE with  $W^r = 30\%$  at the different modes  $\alpha$  ( $\alpha = 1,15...1,45$ ) and  $S^r$  to 2,0 % speed of corrosion below, than at incineration of the undrowned fuel even at low, at the practically absences of «acid peak» corrosion.

On the basis of the got results the graph, giving possibility of determination of resource LTC, is built, maximal values efficiency and minimum charges of fuel, determination of maintenance of harmful matters in gases and their toxicness which can be fixed in basis of development of cards of regimes for organization of the optimum modes exploitation caldrons and used for planning boilers.

Incineration of WFE, decline of intensity of LTC, allows to promote the efficiency of auxiliary boiler to 93 %, depth of utilization - to 65 %, to provide work of tankers auxiliary boiler during a trip due to power resources of ship.

**Keywords:** ship propulsion plant, auxiliary and utilization boilers, water-fuel emulsion, low temperature corrosion, decline of toxicness, efficiency.

Підписано до друку 21.03.07. Папір офсетний. Формат 60x84/16. Гарнітура "Тайме". Друк офсетний. Ум. друк. арк. 0,8. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 120 прим. Зам. № 68.

Друкарня видавництва Національного університету  
кораблебудування, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5