

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ УКРАЇНСЬКИЙ
ДЕРЖАВНИЙ МОРСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені адмірала Макарова

ЗАХАРОВ ЮРІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК 621.43

**ПРОГНОЗУВАННЯ І ПОЛІПШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ**

Спеціальність 05.08.05 - суднові енергетичні установки

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Миколаїв - 2003

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українському державному морському технічному університеті (УДМТУ) імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор Сербін Сергій Іванович, Український державний морський технічний університет, професор кафедри турбін

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор Селезнєв Юрій Володимирович, Миколаївська державна аграрна академія, професор кафедри тракторів та сільськогосподарських машин;
-
- доктор технічних наук, професор Ханмамедов Серго Альбертович, Одеська Національна морська академія, завідувач кафедри суднових дизельних енергетичних установок і технічної експлуатації.
-

Провідна установа - Одеський Національний морський університет Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться «19» травня 2003 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.01 Українського державного морського технічного університету імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м.Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9, ауд.360. '

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Українського державного морського технічного університету імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м.Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9.

Автореферат розісланий «14» квітня 2003 р.

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



Рижков С.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Застосування газотурбінних установок є одним з перспективних напрямків удосконалювання суднових і стаціонарних енергетичних систем. У зв'язку з цим останнє десятиріччя характеризується особливо інтенсивним розвитком газотурбобудування в розвинених у технічному відношенні країнах світу, в тому числі й в Україні.

Наприклад, у США з огляду на зростаючі потреби ринку в екологічно чистих технологіях, модернізації старого устаткування, а також у створенні енергетичних модулів, які працюють на різних видах палива, запропонована нова програма (2001-2015 рр.) по передових турбінних і рухових системах (ATESP), яка вимагає зменшення викидів оксидів азоту і вуглецю газотурбінними установками практично до нульових значень.

Жорсткість міжнародних норм на рівні емісії оксидів вуглецю й азоту, незгорілих вуглеводнів, канцерогенних компонентів, димності, а також прийняття нових "Правил запобігання забрудненню повітряного басейну з суден" визначає актуальність і викликає необхідність комплексного рішення питань екологічного удосконалювання суднових ГТД, що передбачає створення принципово нових конструкцій малотоксичних камер згоряння. Розробка паливоспалюючих пристроїв здійснюється на основі знання фізико-хімічних процесів у таких камерах, основними з яких є розпилювання, сумішоутворення і горіння.

Розглядом різних аспектів проблеми підвищення екологічної чистоти газотурбінних двигунів і установок займаються багато інститутів, університетів, проектних і конструкторських організацій як у нас в країні: Національний технічний університет України "КПІ", Інститут газу НАН України, Інститут технічної теплофізики НАН України (м. Київ), ДП "Науково-виробничий комплекс газотурбобудування "Зоря"-Машпроект", Український державний морський технічний університет (УДМТУ) (м. Миколаїв), Севастопольський національний технічний університет (м. Севастополь), ВАТ "Мотор Січ" (м. Запоріжжя), так і за кордоном: General Electric Company, Solar Turbines Inc., ABB, Catalitica Procession Combustion (США), Rolls-Royce Allison (Англія), Siemens Westinghouse (Німеччина), ЦІАМ, "СНТК ім. М.Д. Кузнецова", "НВО "Сатурн" (Росія) та ін.

На основі аналізу результатів численних теоретичних і експериментальних досліджень вже вироблені основні концепції методів зниження токсичності вихлопних газів ГТД, які дозволяють організувати повне спалювання рідких і газоподібних палив і різко обмежити забруднення атмосфери. Однак дотепер не існує надійних методів теоретичного прогнозування екологічних характеристик суднових ГТД, які необхідні для оптимізації геометричних і режимних параметрів їх камер згоряння з погляду забезпечення мінімальної емісії токсичних речовин. Створення і впровадження подібних методів у практику проектування установок дозволить різко зменшити вартість дослідно-доводочних робіт і підвищити конкурентоздатність українських суднових і стаціонарних газотурбінних двигунів.

Зв'язок роботи з науковими програмами і планами. Дослідження виконане автором-аспірантом на кафедрі турбін машинобудівного факультету УДМТУ в рамках науково-технічних робіт Міністерства освіти і науки України (напрямок 4 "Екологічно чиста енергетика і ресурсозберігаючі технології"): тема 14/1357 "Дослідження фізико-хімічних процесів у плазмохімічних системах термічного знешкодження відходів" (1999-2001 рр.), тема 1478 "Дослідження екологічно чистих плазмохімічних технологій у дизельних і газотурбінних двигунах" (2002 р.), а також відповідно з договором про творчу співдружність між УДМТУ і Науково-виробничим комплексом газотурбобудування "Зоря"-Машпроект" "Дослідження методів зниження токсичності камер згоряння газотурбінних двигунів і створення математичної моделі прогнозування шкідливих викидів" (2002 р.).

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є прогнозування і поліпшення екологічних характеристик суднових газотурбінних двигунів шляхом оптимізації геометричних і режимних параметрів їх камер згоряння на основі створення реакторної моделі утворення і розкладання забруднюючих речовин.

Досягнення цієї мети потребувало розв'язання наступних задач:

- детального аналізу можливостей використання кінетичних схем високотемпературного окиснення вуглеводневих палив у камерах згоряння суднових ГТД для прогнозування й оптимізації їх екологічних характеристик;
- створення математичної моделі утворення і розкладання токсичних компонентів у камерах згоряння суднових ГТД на базі теорії гомогенних і проточних реакторів (реакторної моделі);

- експериментальної перевірки адекватності розробленої математичної моделі на суднових і промислових газотурбінних двигунах;
- теоретичного дослідження механізмів утворення токсичних компонентів на різних режимах роботи ГТД із малоємісйними камерами згоряння;
- оптимізації екологічних параметрів суднових ГТД методом випадкового пошуку;
- впровадження результатів досліджень в практику проектування малотоксичних судових ГТД.

Об'єктом дослідження є судові і промислові газотурбінні двигуни, які працюють на рідкому і газоподібному паливах.

Предметом - робочий процес у малотоксичних камерах згоряння і його моделювання.

Методи дослідження. Поліпшення екологічних характеристик суднових газотурбінних двигунів забезпечено теоретико-експериментальним розв'язанням дослідницьких задач. Для теоретичного аналізу процесів у малотоксичних камерах згоряння використаний підхід, заснований на числовому рішенні системи диференціальних рівнянь, що описує основні закони збереження енергії і переносу хімічних компонентів у хімічно реагуючій системі, з метою збільшення ефективності числового рішення в математичній моделі використаний модифікований алгоритм Ньютона зі спеціальним параметром демпфірування і числовий метод DASAC (Differential Algebraic Sensitivity Analysis Code).

Експериментальні дослідження екологічних характеристик ГТД здійснювалися в стендових умовах Науково-виробничого комплексу газотурбобудування "Зоря"- "Машпроект" електрохімічними методами. При постановці дослідів використана загальна теорія моделювання і планування експериментів, а при обробці даних і перевірці гіпотез - статистичний аналіз.

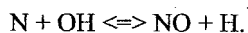
Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше обгрунтовано теоретичну модель прогнозування процесів утворення та розкладання пірогенних забруднювачів у малоємісйній камері згоряння судового ГТД, яка базується на теорії гомогенних і проточних реакторів, з урахуванням змішування та хімічного реагування в основних її зонах.

2. Установлено закономірності кінетичної схеми високотемпературного горіння органічного палива, яка містить в собі 892 хімічні реакції з 113 компонентами, що враховують особливості протікання реакцій взаємодії вищих вуглеводнів, зокрема ароматних, з азотовмісйними з'єднаннями.

3. Визначено, що на холостому ходу і режимах часткових навантажень судового газотурбінного двигуна з зонною камерою згоряння в умовах низьких температур і тисків утворення оксиду азоту NO відбувається за схемою, у якій переважний вплив роблять реакції реагування діоксиду азоту з атомарними воднем і киснем.

4. Уточнено, що в умовах значного переобігрівання паливоповітряної суміші в первинній зоні зонної камери згоряння на режимах роботи, що перевищують 80 % номінального, розширений механізм утворення оксидів азоту повинен бути доповнений реакцією $N_2O + O \rightleftharpoons 2NO$, швидкість утворення NO за якою більше, ніж у 2 рази перевищує швидкість за відомою реакцією



5. Виявлено особливості кінетичного механізму зменшення утворення оксидів азоту в газотурбінному двигуні при подачі води в первинну зону камери згоряння, які показують, що відносні концентрації оксидів азоту слабо змінюються зі зміною режиму двигуна і визначаються в основному величиною відносної витрати води.

6. Вперше запропоновано в методі оптимізації екологічних характеристик судових ГТД випадковим пошуком використовувати в якості цільової функції сумарний фактор токсичності на виході з первинної зони камери згоряння з урахуванням хімічного складу і кількості відпрацьованих газів двигунів.

Достовірність результатів досліджень забезпечується коректністю застосовуваних методик, прийнятною точністю одержання експериментальних даних, математико-статистичною їх обробкою, задовільним узгодженням результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Створено математичну модель реакторного типу камери згоряння суднового ГТД, яка може бути рекомендована для розрахунків малотоксичних паливоспалюючих пристроїв з урахуванням розмаїтості їх геометричних конфігурацій і схем.

2. Числовими методами визначені графічні залежності зміни концентрації стабільних і проміжних продуктів по довж зонної камери згоряння на різних режимах її роботи, які можуть бути корисними при розробці й експериментальному доведенні суднових малоємісйних паливоспалюючих пристроїв.

3. Визначено раціональні співвідношення між витратами палива через перший і другий канали паливкового пристрою газотурбінного двигуна GT3000, які забезпечують викиди оксидів азоту і вуглецю на його вихлопі відповідно до вимог нормативних документів.

4. Здійснено оптимізацію екологічних характеристик двигуна GT3000, яка показала можливості їх подальшого поліпшення і наближення до кращих світових аналогів за рахунок удосконалювання зонної організації робочого процесу в камері згоряння.

5. Встановлено, що організація малоємісйного горіння за технологією RQQL ("багате" горіння - швидке розведення - "бідне" горіння) у камері згоряння суднового ГТД GT25000 дозволить задовольнити вимоги по викидах оксидів азоту на всіх експлуатаційних режимах.

Впровадження результатів досліджень здійснювалося шляхом розробки рекомендацій з вибору параметрів, оптимізації і проектуванню малотоксичних камер згоряння для Центра науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт "Машпроект" (м. Миколаїв), а також шляхом використання розроблених обчислювальних програм моделювання утворення і розкладання забруднюючих речовин у паливоспалюючих пристроях в УДМТУ при виконанні курсових і дипломних проектів за спеціальностями "Турбіни" і "Екологія і охорона навколишнього середовища".

Особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- створенні математичної моделі реакторного типу камери згоряння газотурбінного двигуна;
- розробці програм і методик теоретичних і експериментальних досліджень;
- розкритті механізмів утворення основних пірогенних забруднювачів у малотоксичних камерах згоряння;
- участі в експериментальних дослідженнях екологічних характеристик газотурбінних двигунів і обробці їх результатів;
- прогнозуванні й оптимізації екологічних характеристик суднових ГТД;
- розробці пропозицій по удосконалюванню робочого процесу зонних камер згоряння.

Апробація роботи. Основні результати доповідалися й обговорювалися на Міжнародній конференції по моделюванню ASME-Conference MS'2001 (Львів, 2001 р.), 3-ій Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми енергозбереження й екології в суднобудуванні" (Миколаїв, 2002 р.), науково-методичній конференції "Могилянські читання - 2001" (Миколаїв, 2001 р.), конференції професорсько-викладацького складу УДМТУ (Миколаїв, 2002 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 9 друкованих наукових праць, з них 5 статей у спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ВАК України.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і рекомендацій, списку літератури з 105 найменувань і додатків. Робота містить 171 сторінку машинописного тексту, 12 таблиць і 39 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність, сформульовані мета і задачі дослідження, відбиті наукова новизна і практична цінність результатів, що виносяться на захист, обрані об'єкт и предмет дослідження.

У першому розділі проведений огляд сучасних методів зниження і прогнозування шкідливих викидів суднових газотурбінних двигунів. Показано, що вибір і обґрунтування схеми високотемпературного окиснення вуглеводнів у сполученні з механізмом утворення і розкладання основних пірогенних забруднювачів у камерах згоряння ГТД повніші робитися на підставі ідентифікації розроблених кінетичних схем за даними натурних експериментів і можливості в рамках цих кінетичних механізмів прогнозувати зміну емісії токсичних компонентів у залежності від геометричних і режимних параметрів двигунів.

На основі аналізу існуючих математичних моделей сформульовані вимоги до аналітичних моделей камер згоряння суднових ГТД, які розробляються для прогнозування характеристик шкідливих викидів. Найбільш перспективним визнано використання реакторних моделей, заснованих на розбивці об'єму камери згоряння на ряд послідовно і паралельно розташованих зон (реакторів), що відрізняються характеристиками фізико-хімічних процесів. У цьому випадку можливо детальне моделювання процесів хімічної кінетики, яке включає сотні проміжних хімічних реакцій високотемпературного і низькотемпературного окиснення різних вуглеводнів і утворення токсичних речовин.

У підсумку сформульовані мета і задачі досліджень.

Другий розділ присвячений розробці математичної моделі малотоксичної камери згоряння суднового ГТД.

Створено структурно-логічну схему камери (рис1), яка в загальному випадку містить K гомогенних реакторів ГР, плазмохімічний реактор ПХР, L адіабатних змішувачів АС, M проточних реакторів ПР і N гомогенних реакторів добавок ГРД.

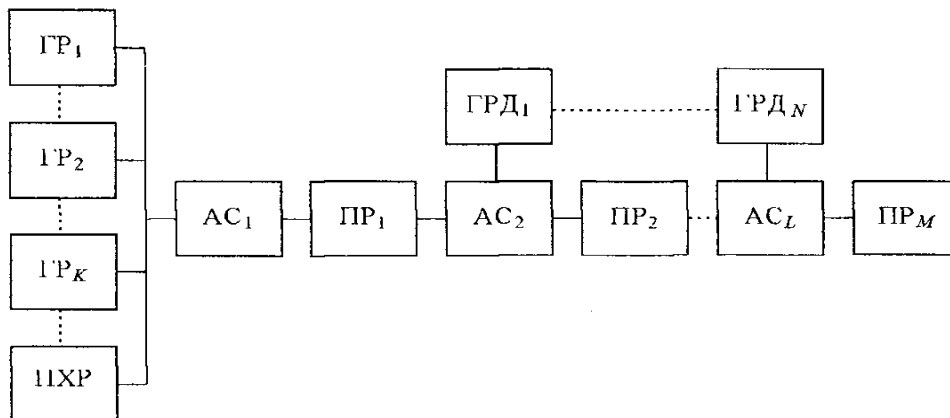


Рис.1. Структурно-логічна схема камери згоряння ГТД:
ГР - гомогенний реактор; ПХР - плазмохімічний реактор;
АС - адіабатний змішувач; ГРД - гомогенний реактор добавок;
ПР - проточний реактор

Гомогенні реактори ГР моделюють процеси окиснення пального у фронтних зонах камери згоряння. Їх кількість визначається кількістю стабілізуючих (завіхрюючих) і паливоспалюючих пристроїв у жаровій трубі. Плазмохімічний реактор ПХР може бути встановлений у зоні первинного сумішоутворення камери для активації процесів запалення і горіння палива. Продукти ГР і ПХР направляються в адіабатний змішувач АС, де в припущенні відсутності підведення або відводу тепла організується їх змішування. Проточні реактори ПР моделюють процеси хімічного реагування в первинній, проміжній і вторинній зонах камери, відповідно до особливостей кінетичного механізму і супровідних його фізичних явищ. подача повітря через отвори жарової труби, а також додаткове підведення палива і компонентів, які сприяють зменшенню емісії забруднювачів (наприклад, водяної пари, плазмохімічних продуктів та ін.), організовуються в гомогенних ректорах добоавок ГРД. Продукти ГРД і компоненти реагуючих ПР направляються в адіабатні змішувачі, загальна кількість яких $L = N + 1$.

Процеси в гомогенних і плазмохімічному ректорах, а також у гомогенних ректорах добоавок моделюються з використанням рівнянь збереження маси й енергії стосовно до хімічно реагуючої системи всередині об'ємів реакторів.

Балансове рівняння утворення і розкладання хімічних компонентів має вигляд

$$\frac{dY_k}{dt} = -\frac{1}{\tau}(Y_k - Y_k^*) + \frac{\dot{\omega}_k W_k}{\rho}, \quad (1)$$

де Y_k – масова частка k -го компоненту; t – час; τ – умовний час перебування суміші в об'ємі реактора; Y_k^* – масова частка компонентів на вході реактора; $\dot{\omega}_k$ – ступінь утворювання (розкладання) k -ої частки в одиниці об'єму внаслідок хімічної реакції; W_k – молекулярна вага k -го компоненту; ρ – масова густина суміші.

Балансове рівняння енергії для гомогенного, плазмохімічного реакторів і гомогенного реактора добоавок записується в такий спосіб:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^K (Y_k h_k - Y_k^* h_k^*) - \frac{Q}{\rho V}, \quad (2)$$

де h – середня ентальпія суміші; K – загальна кількість хімічних компонентів в реакції; h_k і h_k^* – питома ентальпія k -го компоненту в об'ємі і на вході реактора; Q – теплові втрати в реакторі (у випадку ПХР – тепловиділення в реакторі); V – об'єм реактора.

Оскільки усереднена ентальпія суміші в реакторі $h = \sum_{k=1}^K h_k Y_k$, то

$$\frac{dh}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} + \sum_{k=1}^K h_k \frac{dY_k}{dt}. \quad (3)$$

Тут $c_p = \sum_{k=1}^K Y_k c_{p,k}$ – питома теплоємність суміші при постійному тиску;

$c_{p,k}$ – питома теплоємність k -го компонента при постійному тиску.

Об'єднавши рівняння (1)-(3), одержимо наступний запис балансового рівняння переносу хімічних компонентів

$$c_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^K Y_k^* (h_k^* - h_k) - \sum_{k=1}^K \frac{h_k \dot{\omega}_k W_k}{\rho} - \frac{Q}{\rho V}. \quad (4)$$

Для рішення системи (4) використаний модифікований метод Ньютона.

Розрахунок процесів хімічного реагування в проточних реакторах полягає в прогнозуванні зміни стану гомогенної хімічно реагуючої газової суміші з початковими значеннями концентрації компонентів і температури в закритій системі протягом визначеного часу перебування в цій системі.

Рівняння матеріального балансу компонентів має вигляд:

$$\frac{dY_k}{dt} = \nu \dot{\omega}_k W_k, \quad (5)$$

де $\nu = V / m$ – питомий об'єм, а масова частка k -го компонента $Y_k = m_k / m$.

Рівняння збереження енергії буде виглядати так:

$$c_p \frac{dT}{dt} + \nu \sum_{k=1}^K h_k \dot{\omega}_k W_k = 0. \quad (6)$$

Для рішення системи диференціальних рівнянь (5) – (6) застосований числовий метод DASAC (Differential Algebraic Sensitivity Analysis Code), що використовує спеціальний диференціальний запис BDF (Backward Differentiation Formula).

У сполученні з механізмом утворення і розкладання пірогенних забруднювачів розроблена кінетична схема високотемпературного реагування вуглеводнів, заснована на детальному описі хімічних реакцій окиснення метану, етану, етилену, пропану, яка містить 892 реакції з 113 компонентами. Перші 186 реакцій описують механізм утворення азотовмісних з'єднань, а інші - кінетичний механізм горіння вуглеводневого палива. Компоненти кінетичної схеми наступні: HCN, NO, HNCO, N₂O, CO, CO₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, H₂O, CH₂O, NO₂, H, O, OH, O₂, H₂, HO₂, H₂O₂, HCO, C₃H₃, C₂H₅, CH₃O, CH₃OH, CH₂OH, C₃H₆, CH₂CO, C₂H₃, CH₃NCO, C₂H₄O₂H, CH₂NCO, C₂H, CHOCNO, AC₃H₄, C₂H₃O, CH₃CO, C₄H₄, C₄H₆, HCCOH, C₂H₂OH, AC₃H₅, SC₃H₅, IC₄H₃, C₄H₂, CHOCO, C₂H₄O, NH₃, HCCO, CH₂, CH₃, SCH₂, CH, C, HNO, HONO, H₂NO, N, H₂CN, NNH, NH₂, NH, N₂H₂, CN, NCO, C₂N₂, HOCN, HCNO, NCN, PC₃H₄, N₂, C₃H₈, NC₃H₇, IC₃H₇, TC₃H₅, C₃H₆O, C₃H₅O, ACROL, C₃H₄O₂H, C₃H₄O, C₃H₃O, C₃H₄OH, C₃H₂, NC₄H₃, NC₄H₅, IC₄H₅, H₂C₄O, C₂H₃CO, MEALL, C₆H₆, BUTYNE, C₄H₈, C₂C₄H₈, T2C₄H₈, C₆H₆, NC₄H₁₀, PC₄H₉, SC₄H₉, CPD, HEX1245, MC₆H₆, FULVENE, C₆H₁₀, C₆H₇C, C₆H₉, C₆H₅, C₆H₅O, C₅H₅, C₆H₅OH, C₅H₅O, C₅H₄OH, C₅H₄O, C₄H.

На рис.2 представлено порівняння розрахункових значень концентрації оксидів азоту NO_x з експериментальними даними, отриманими при вивченні турбулентного горіння попередньо перемішаних метаноповітряних сумішей у широкому діапазоні зміни їх початкових температур і тисків. Криві 1 відповідають тиску $p = 1,00$ МПа; температурі $T = 615$ К; часу перебування суміші $\tau = 30$ мс; витраті $G = 19,3$ г/с; криві 2 – $p = 0,51$ МПа; $T = 520$ К; $\tau = 32$ мс; $G = 3,90$ г/с; криві 3 – $p = 0,50$ МПа; $T = 300$ К; $\tau = 28$ мс; $G = 10,3$ г/с.

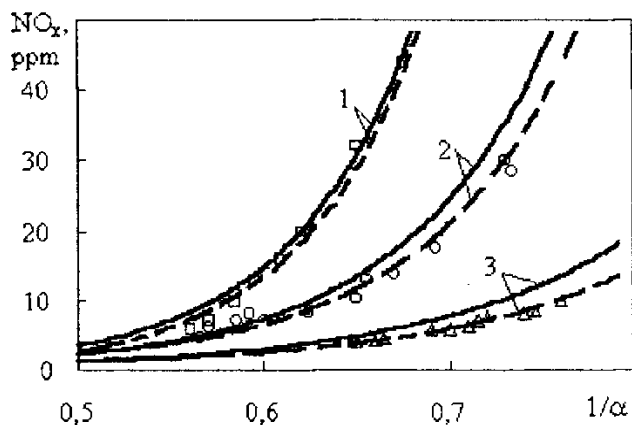


Рис.2. Порівняння експериментальних і розрахункових даних з емісії NO_x в турбулентному метаноповітряному полум'ї:
 $\square, \circ, \triangle$ – експеримент;
 ———— – схема з 258 реакціями;
 - - - - - запропонована схема

Результати розрахунків, виконаних на базі розробленої схеми високотемпературного окиснення вуглеводнів, задовільно узгоджуються з експериментальними даними, що дозволяє обґрунтувати її застосовність для дослідження процесів у паливо-спалюючих пристроях різних типів з урахуванням утворення пірогенних забруднювачів.

Результати дослідження і прогнозування екологічних характеристик ГТД приведені в **третьому розділі**.

Проведено ідентифікацію результатів математичного моделювання з результатами, отриманими при експериментальних дослідженнях екологічних характеристик ГТД GT3000, який створено на базі корабельного реверсивного двигуна 3-го покоління M75.

Пальниковий пристрій камери згоряння цього двигуна (рис.3) призначений для забезпечення оптимального складу паливоповітряної суміші на всіх режимах роботи ГТД (від холостого ходу до номінального навантаження). Паливо з першого каналу корпусу пальникового пристрою подається в газову порожнину відцентрового завихрювача першого каналу і через систему отворів у стінках лопаток надходить у його міжлопаточні канали, де перемішується з повітрям. Паливо із другого каналу корпусу пальникового пристрою подається в завихрювач другого каналу, проходить через систему отворів у стінках лопаток і змішується з повітрям у міжлопаточних каналах.

Експериментальні дослідження проводились на стендах ДП "Наукововиробничий комплекс газотурбобудування "Зоря"-Машпроект". В процесі досліджень штатними засобами стенда виконувалися заміри таких характеристик ГТД, як температура зовнішнього повітря, тиск і температура за КВТ, загальні витрати повітря і палива через камеру згоряння, частота обертання вала КВТ, а також екологічних характеристик (рівень концентрації оксидів азоту, оксиду вуглецю і кисню в відхідних газах) при різних режимах роботи двигуна.

Розрахункові значення емісії забруднювачів C_{CO} , C_{NO_x} (рис.4) добре корелюються з експериментальними даними при різних частотах обертання компресора високого тиску $n_{\text{КВТ}}$. Деяка непогодженість результатів прогнозування викидів оксидів азоту з вимірами на режимі $\bar{N} = 0,50$ пояснюється недостатньою вивченістю характеру процесів сумішоутворення в зоні зворотних струмів жарової труби на цьому перехідному режимі.

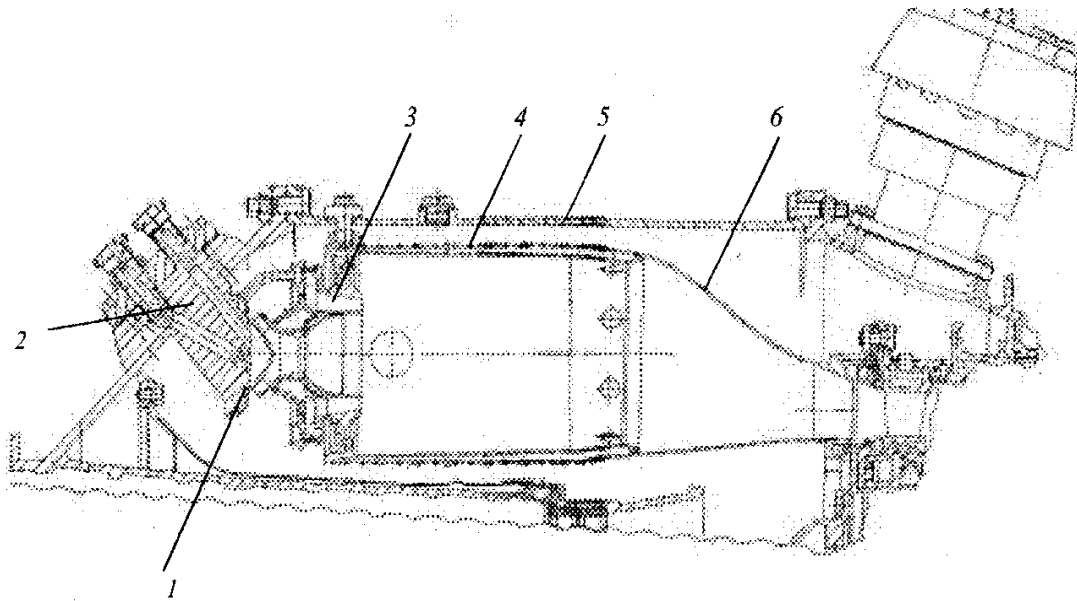


Рис.3. Конструктивна схема камери згоряння ГТД GT3000:
 1 - радіально-осьовий завихрювач 1-го каналу; 3 - завихрювач 2-го каналу; 4 - жарова труба;
 5 - кожух камери згоряння; 6 - змішувач

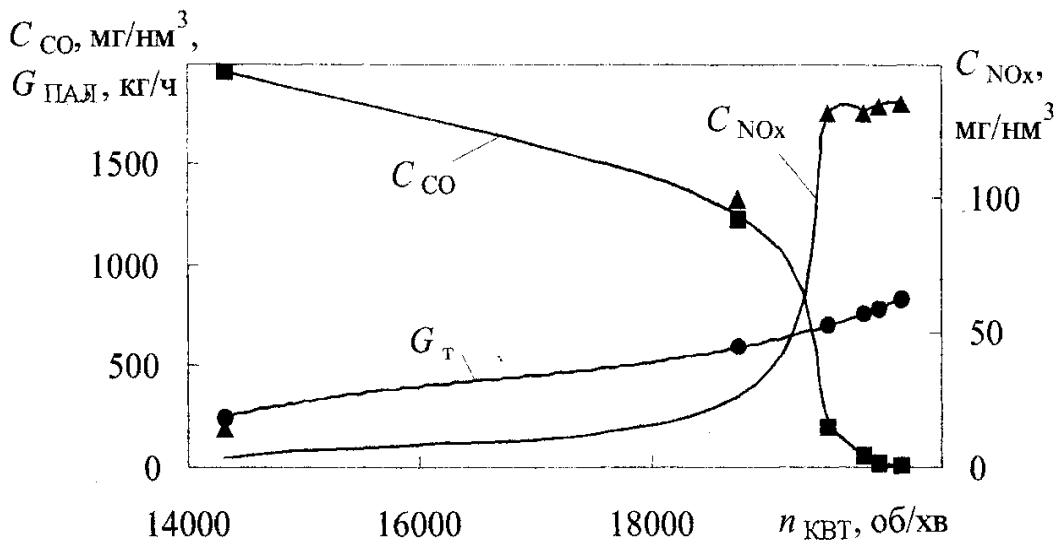


Рис.4. Залежності викидів токсичних компонентів на вихлопі ГТД і витрати палива $G_{\text{пал}}$ (●) від режиму роботи:
 ▲, ■ – експеримент; ——— – розрахунок по запропонованій моделі

Наведені результати свідчать про те, що зонна організація процесів сумішоутворення і горіння є ефективним засобом підвищення екологічної чистоти газотурбінних двигунів.

На прикладі газотурбінного двигуна GT3000 розглянуті закономірності зміни концентрації основних хімічних сполук поздовж малотоксичної зонної камери згоряння на різних режимах його роботи.

На рис.5 приведені залежності концентрації C основних забруднювачів: оксиду вуглецю CO і оксидів азоту NO і N_2O від часу t перебування продуктів у жаровій трубі для трьох режимів роботи двигуна: номінального $\bar{N}=1,0$

(рис.5,а), $\bar{N} = 0,8$ (рис.5,б) і холостого ходу (рис.5,в). Механізми утворення і розкладання забруднювачів для перших двох режимів подібні внаслідок практично однакових умов сумішоутворення у фронтальному пристрої камери і відрізняються лише кількісним співвідношенням розглянутих компонентів, яке залежить від температурних умов і тиску в камері згоряння. В той же час на режимі холостого ходу істотне зменшення концентрації оксиду вуглецю спостерігається тільки у високотемпературній ділянці жарової труби (час $t < 5$ мс), а концентрації N_2O на виході двигуна можуть навіть перевищувати концентрації NO (при незначних їх абсолютних величинах).

З метою детального дослідження механізму утворення і розкладання забруднюючих речовин у первинній зоні камери згоряння ГТД на різних режимах його роботи проведений аналіз внеску основних реакцій на зміну концентрації оксидів азоту NO і N_2O , оксиду вуглецю CO , метану CH_4 і пропану C_3H_8 для різних режимів роботи двигуна.

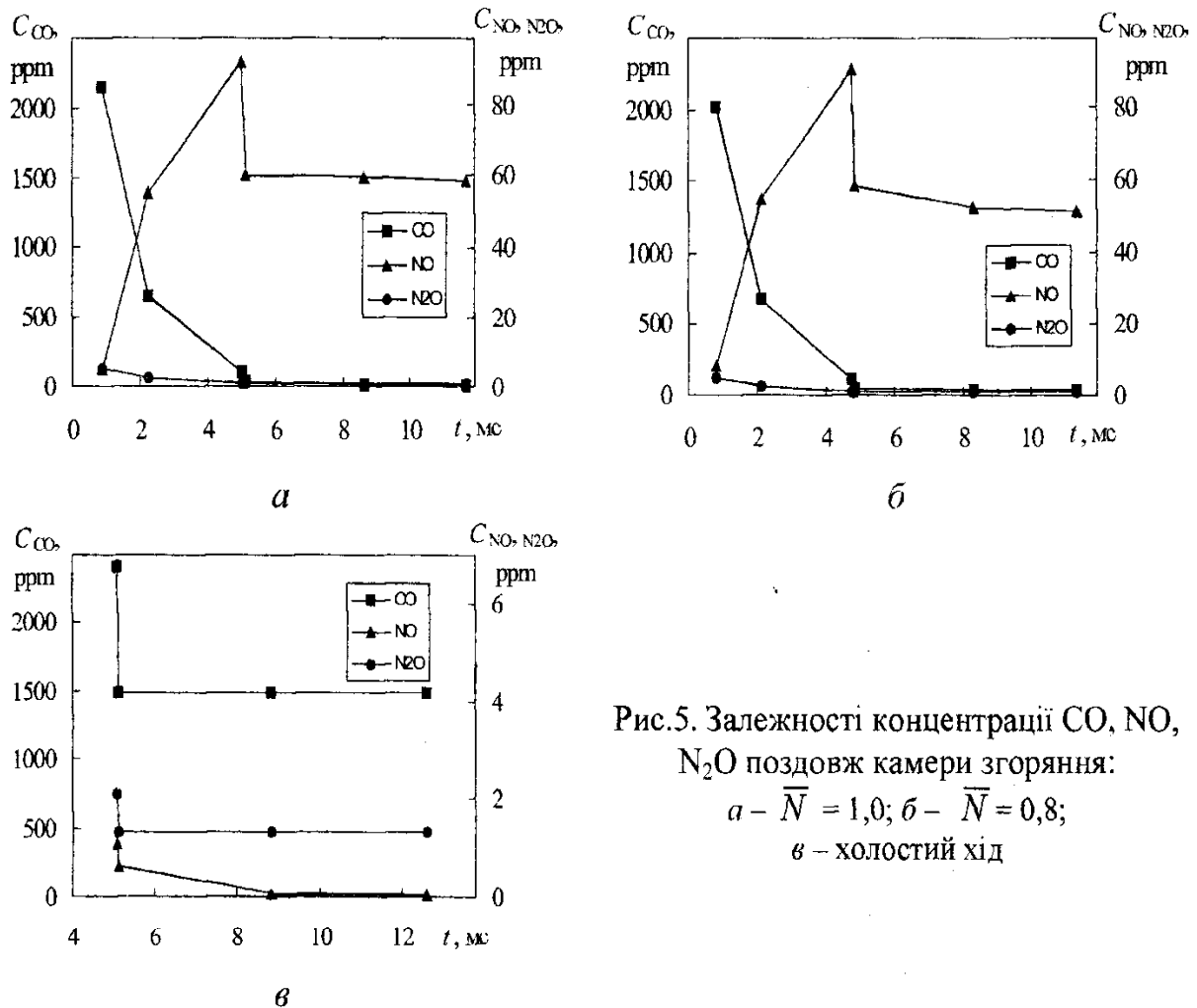


Рис.5. Залежності концентрації CO , NO , N_2O поздовж камери згоряння:
 а – $\bar{N} = 1,0$; б – $\bar{N} = 0,8$;
 в – холостий хід

Дані табл.1 показують, що в умовах значного перезбіднення паливоповітряної суміші в первинній зоні зонної камери згоряння на режимах роботи, що перевищують 80 % номінального, механізм утворення оксиду азоту NO визначається реакціями $N_2 + O \rightleftharpoons N + NO$; $N + O_2 \rightleftharpoons NO + O$; $N_2O + O \rightleftharpoons 2NO$, останньої з яких немає в розширеному механізмі Я.Б.Зельдовича.

На холостому ході двигуна з зонною камерою згоряння в умовах низьких температур і тисків утворення NO відбувається за зміненою схемою: $NO_2 + H \rightleftharpoons NO + OH$; $NO_2 + O \rightleftharpoons NO + O_2$; $N_2O + O \rightleftharpoons 2NO$, в якій переважний

вплив роблять реакції реагування діоксида азоту з атомарними воднем і киснем і відсутні реакції, характерні для термічного механізму Я.Б.Зельдовича.

Таблиця 1

Швидкості утворення (розкладання) оксиду азоту NO
в первинній зоні камери згоряння ($\bar{N} = 1,0$)

Хімічні реакції	Швидкість утворення, моль/(см ³ ·с)	Загальна швидкість утворення і розкладання, моль/(см ³ ·с)
$N_2+O \rightleftharpoons N+NO$	$3,79 \cdot 10^{-7}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$
$N+O_2 \rightleftharpoons NO+O$	$3,25 \cdot 10^{-7}$	$-6,34 \cdot 10^{-8}$
$N+OH \rightleftharpoons NO+H$	$5,29 \cdot 10^{-8}$	
$NH+NO \rightleftharpoons N_2O+H$	$1,81 \cdot 10^{-8}$	
$NO+HO_2 \rightleftharpoons NO_2+OH$	$1,99 \cdot 10^{-8}$	
$NO+OH+M \rightleftharpoons HONO+M$	$-1,75 \cdot 10^{-9}$	
$NO+H+M \rightleftharpoons HNO+M$	$1,37 \cdot 10^{-8}$	
$NO_2+H \rightleftharpoons NO+OH$	$1,41 \cdot 10^{-8}$	
$NO_2+O \rightleftharpoons NO+O_2$	$2,78 \cdot 10^{-8}$	
$NO_2+M \rightleftharpoons NO+O+M$	$-6,10 \cdot 10^{-8}$	
$N_2O+O \rightleftharpoons 2NO$	$1,14 \cdot 10^{-7}$	

Для поліпшення екологічних характеристик газотурбінного двигуна GT16000, що працює на вакуумному газойлі і дизельному паливі, проведені його теплотехнічні іспити із системою впорскування знесоленої води через спеціальні водоналивні форсунки. Проведені випробування на режимах від 8 до 13 МВт показали, що подача води в камеру згоряння забезпечує зниження емісії оксидів азоту на вихлопі двигуна в 1,5... 1,9 рази в залежності від відношення витрати води до витрати палива $G_B / G_{\text{пал}}$. Підвищення вмісту оксидів вуглецю і вуглеводнів у вихлопних газах при впорскуванні води лежить у припустимих межах.

Дані, приведені на рис.6, показують, що реакторна модель утворення і розкладання пірогенних забруднювачів може бути ефективно використана для прогнозування екологічних характеристик сучасних газотурбінних двигунів із системою подачею води і водяної пари в камеру згоряння.

При розв'язанні задачі оптимізації екологічних характеристик суднових ГТД з малотоксичними зонними камерами згоряння у **четвертому розділі** в якості цільової функції запропоновано використовувати сумарний фактор токсичності на виході з первинної зони камери згоряння.

Фактор токсичності є безрозмірною величиною, яка рівна кратності розведення відпрацьованих газів чистим повітрям, необхідним для доведення концентрації досліджуваного компонента до гранично допустимої за санітарними нормами:

$$\Phi_i = C_i / \text{ГДК}_i,$$

де C_i – концентрація i -ої шкідливої речовини в продуктах згоряння (може бути приведена до визначеного коефіцієнта надлишку повітря);
ГДК _{i} – його гранично допустима концентрація.

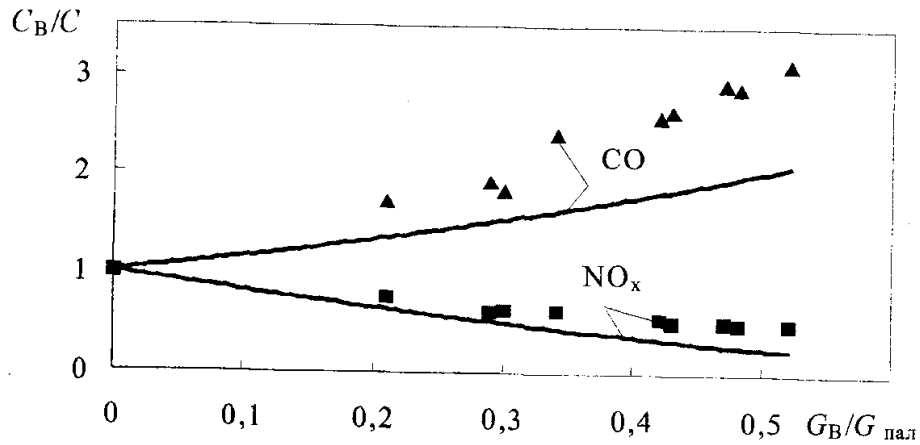


Рис.6. Відносна зміна концентрацій C оксидів вуглецю і азоту на вихлопі двигуна GT16000 при зміні кількості води, що подається в камеру згоряння ($\bar{N} = 1,0$):
 \blacktriangle , \blacksquare – експеримент; ———— – розрахунок за кінетичною моделлю

У загальному випадку сумарний фактор токсичності на виході з первинної зони малотоксичної камери згоряння суднового ГТД можна записати у вигляді

$$\Phi_{1\Sigma} = \Phi_{1\Sigma}[\bar{X}, Y(\bar{X}), Z].$$

Для цієї залежності відшукується таке сполучення параметрів, яке забезпечує її мінімум при наявності обласних і функціональних обмежень:

$$\bar{X}_{\min} \leq \bar{X} \leq \bar{X}_{\max} \quad \text{і} \quad Y_{\min} \leq Y[\bar{X}, Y(\bar{X})] \leq Y_{\max}.$$

Тут \bar{X} – вектор параметрів, що безупинно змінюються і які діють в оптимізуемій системі; Z – параметри, що дискретно змінюються.

При відомих масових концентраціях C токсичних компонентів CO , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , C_3H_8 , NO , NO_2 , CH_2O , C на виході первинної зони (їх кількість обрана з урахуванням можливостей реакторної моделі) можна визначити цільову функцію в такий спосіб:

$$F = \Phi_{1\Sigma} = \frac{C_{\text{CO}}}{\text{ГДК}_{\text{CO}}} + \frac{C_{\text{CH}_4} + C_{\text{C}_2\text{H}_2} + C_{\text{C}_2\text{H}_6} + C_{\text{C}_3\text{H}_8}}{\text{ГДК}_{\text{C}_x\text{H}_y}} + \frac{1,533 \cdot C_{\text{NO}} + C_{\text{NO}_2}}{\text{ГДК}_{\text{NO}_2}} + \frac{C_{\text{CH}_2\text{O}}}{\text{ГДК}_{\text{CH}_2\text{O}}} + \frac{C_C}{\text{ГДК}_C}.$$

Для розв'язання задачі мінімізації цільової функції використовується метод випадкового пошуку разом з алгоритмом безперервного самонавчання.

У якості оптимізуемих параметрів для двигуна GT3000 обрані об'єми завихрювачів першого і другого каналу пальникового пристрою (об'єми паралельно розташованих гомогенних реакторів V_1 , V_2), об'єми зони зворотних течій і первинної зони (об'єми послідовно розташованих гомогенних реакторів V_3 , V_4), коефіцієнти надлишку повітря в першому і другому каналах пальникового пристрою α_1 і α_2 , секундна витрата палива через перший канал пальникового пристрою жарової труби $G_{\text{пал1}}$.

У результаті розв'язання оптимізаційної задачі для номінального режиму роботи ГТД отримані раціональні значення семи визначальних параметрів: об'єми завихрювачів першого і другого каналу пального пристрою 84,9 і 135,2 см³, об'єми зворотних течій і первинної зони 400 і 819,9 см³, коефіцієнти надлишку повітря в першому і другому каналах 2,18 і 2,22, секундна витрата палива через перший канал 12,15 г/с.

Залежності масових концентрацій C і цільової функції F отримані перерізом гіперповерхні $F = F(V_1, V_2, V_3, V_4, \alpha_1, \alpha_2, G_{\text{пал1}})$ плоскістю, яка проходить через точку мінімуму паралельно координатним вісям. За цими залежностями можна знайти зміну цільової функції при варіюванні одного з параметрів, який безупинно змінюється, і оптимальних значеннях інших.

На рис.7 приведені залежності цільової функції F , масових концентрацій оксидів вуглецю CO і азоту NO від об'єму завихрювачів першого (рис.7,а) і другого (рис.7,б) каналів пального пристрою, від коефіцієнта надлишку повітря в першому (рис.7,в) і другому (рис.7,г) каналах пального пристрою і від секундної витрати палива через перший канал пального пристрою жарової труби (рис.7,д).

Отримане оптимальне сполучення семи геометричних і режимних параметрів камери згоряння використано в розрахунках процесів утворення і розкладання основних забруднюючих речовин на номінальному режимі двигуна GT3000 (табл.2). Розрахункові оптимальні значення концентрації оксидів вуглецю й азоту менше експериментальних у 1,9 і 6,6 рази.

Таблиця 2

Результати оптимізації екологічних характеристик ГТД GT3000						
	$\bar{N} = 1,0$		$\bar{N} = 0,8$		Холостий хід	
	CO	NO _x	CO	NO _x	CO	NO _x
	мг/м ³					
Експеримент	10	134	60	131	1961	14,4
Розрахунки базового варіанта	9,96	135,17	55,15	132,85	1960,40	0,81
Результати оптимізації	5,26	20,16	34,21	46,48	239,27	4,77

Проведена також оптимізація екологічних характеристик ГТД GT3000 на режимі 80 % навантаження і на холостому ході. На холостому ході оптимальні значення концентрації оксидів вуглецю й азоту менше експериментальних у 8,2 і 3,0 рази.

Впровадження результатів досліджень, описане в п'ятому розділі, здійснювалося за наступними напрямками:

- створення обчислювальної програми утворення і розкладання пірогенних забруднювачів у камерах згоряння, адаптованої до використання в системах автоматизованого проектування судових і стаціонарних газотурбінних двигунів;
- поліпшення екологічних характеристик ГТД різних типів на основі запропонованих алгоритмів оптимізації і реакторної моделі малотоксичної камери згоряння.

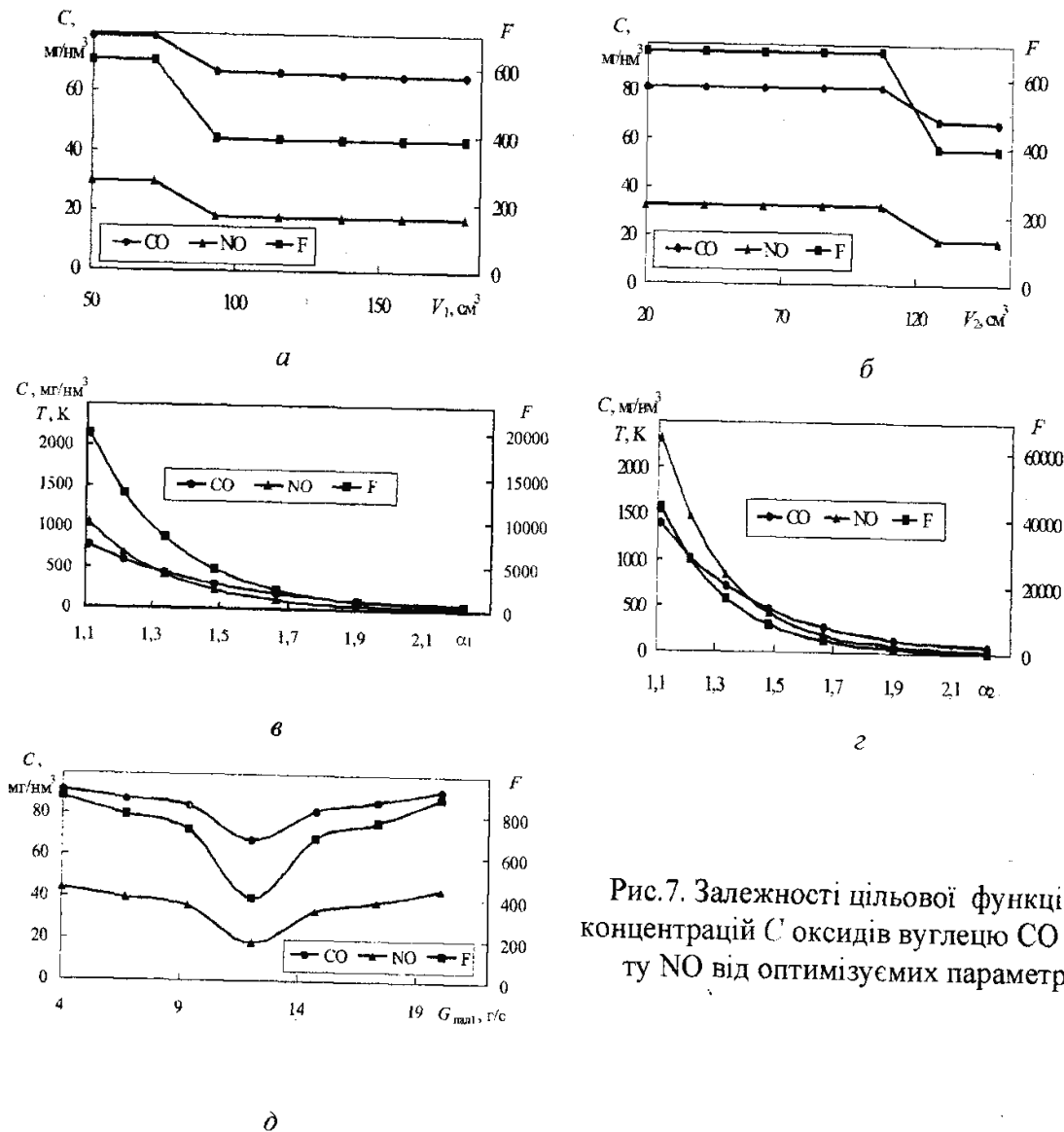


Рис.7. Залежності цільової функції F , концентрацій C оксидів вуглецю CO і азоту NO від оптимізуємих параметрів

Модульна програма утворення і розкладання пірогенних забруднювачів у паливоспалюючих пристроях PSRSN впроваджена в навчальний процес УДМГУ і використовується для виконання курсових і дипломних проектів за спеціальностями "Турбіни" і "Екологія і охорона навколишнього середовища".

З метою розробки практичних рекомендацій з підвищення екологічної чистоти суднового двигуна GT25000 проведені розрахунки викидів забруднюючих речовин при його роботі на п'ятих режимах і порівняння результатів моделювання з експериментальними даними, отриманими на ДП НВКГ "Зоря"- "Машпроект", а також оптимізація екологічних характеристик двигуна. На рис.8 представлено порівняння залежностей масових концентрацій NO_x і CO на вихлопі двигуна від годинної витрати палива $G_{\text{пал}}$, отриманих експериментально і розрахунковим шляхом, для базової (неоптимізованої) конструкції камери згоряння. Видна задовільна кореляція розрахункових і дослідних даних у всьому діапазоні досліджених режимів. Трохи занижені розрахункові дані по викидах CO на холостому ході і режимах часткових навантажень пояснюються

впливом фізичних процесів перемішування рідкого палива з окислювачем у первинній зоні камери згоряння, що у розробленій моделі повністю не враховується.

Проведені оптимізаційні розрахунки показують, що раціональним варіантом для суднового ГТД GT25000 є використання технології RQQL "багате" горіння - швидке розведення - "бідне" горіння (Rich - Quick Quench - Lean). Відповідно до цієї технології в камері згоряння є три послідовно розташовані зони горіння. У першій формується горіння "багатої" паливоповітряної суміші. В другій - продукти неповного згоряння інтенсивно змішуються з відносно великою кількістю повітря (зона різкого розведення). Змішування продуктів неповного згоряння з повітрям знижує температуру суміші, що надходить у зону "бідного" горіння. У третій зоні здійснюється горіння "бідної" паливоповітряної суміші, що формується на виході з зони різкого розведення.

Розрахункове оптимальне значення концентрації оксидів азоту NO_x на номінальному режимі GT25000 при реалізації технології RQQL складає 133,5 мг/нм³, що в 3,2 рази менше величини, досягнутої в ході стендових випробувань двигуна, і відповідає сучасним вимогам екологічної чистоти суднових ГТД.

Виявлено, що найбільш ефективний шлях до зменшення емісії токсичних компонентів полягає в розробці таких конструктивних схем регульованих камер згоряння, що дозволили б змінювати геометрію жарової труби і розподіл витрат повітря і палива при зміні режимів роботи двигуна. У цьому випадку відповідно до отриманих розрахункових результатів можлива підтримка екологічних показників газотурбінних двигунів на рівні, що мало змінюється від навантаження двигуна.

На рис.9 показані залежності масових концентрацій NO_x і CO на вихлопі двигуна GT3000 від частоти обертання компресора високого тиску при оптимальному сполученні геометричних і режимних параметрів камери згоряння на всіх режимах роботи двигуна (криві 1) і експериментальні дані базового (неоптимізованого) варіанта. При оптимальному співвідношенні параметрів на всіх режимах двигуна концентрації NO_x змінюються від 5 до 46,5 мг/нм³, а концентрації CO - від 239,3 до 5 мг/нм³ (в експериментах базового варіанта NO_x змінюється від 14,4 до 134 мг/нм³, а CO - від 1961 до 10 до мг/нм³).

Варіант цілком регульованої камери згоряння майже зовсім виключається в практиці, тому що різке ускладнення конструкції не виправдовується одержуваними екологічними перевагами. Однак використання навіть простих (з погляду механіки) дво- або трипозиційних регулюючих пристроїв у ряді випадків доцільно для зменшення викидів токсичних речовин до допустимих рівнів відповідно до вимог замовників.

Для ГТД газоперекачувального агрегату, що велику частину часу експлуатується на режимі номінального навантаження, більш доцільні камери згоряння постійної геометрії. У цьому випадку необхідно орієнтуватися на розрахунковий режим двигуна, тому значення фактора токсичності на часткових режимах виявляються трохи вище оптимальних. Криві 2 на рис.9 відповідають оптимальному співвідношенню геометричних параметрів на одному номінальному режимі роботи GT3000, яке не змінюється на всіх перехідних режимах. У цьому випадку концентрації NO_x змінюються від 2 до 51,8 мг/нм³, а концентрації CO - від 1539 до 5 мг/нм³.

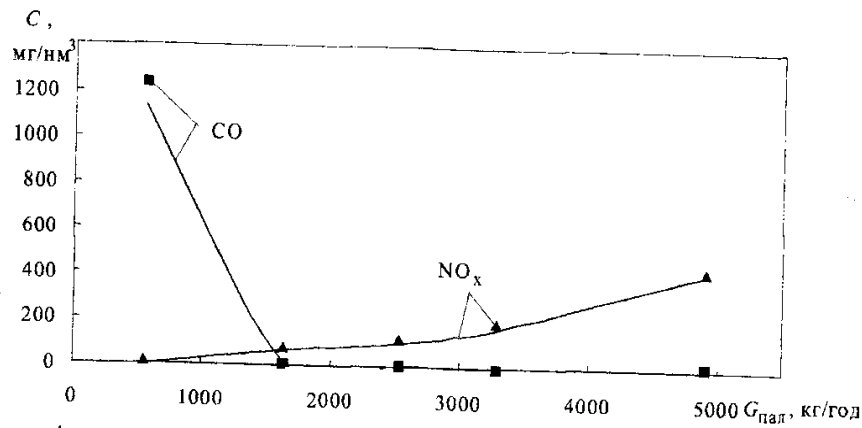


Рис.8. Залежності концентрацій NO_x і CO від годинної витрати палива для суднового газотурбінного двигуна GT25000:

▲, ■ - експеримент; — - розрахунок за розробленою моделлю

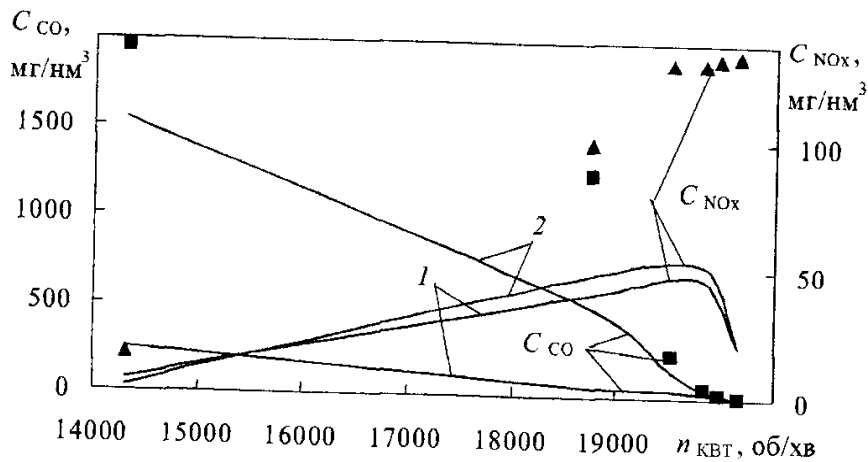


Рис.9. Залежності емісії токсичних компонентів на вихлопі двигуна GT3000 від частоти обертання КВТ:

▲, ■ - експеримент; — - розрахункові результати оптимізації;
1 - камера зі змінюваною геометрією; 2 - камера постійної геометрії

Розроблені рекомендації по удосконалюванню екологічних характеристик суднового газотурбінного двигуна GT25000 і двигуна GT3000 для газоперекачувального агрегату використані на ДП "Науково-виробничий комплекс газотурбобудування "Зоря"- "Машпроект" (м. Миколаїв) при проектуванні перспективних малотоксичних камер згоряння та при доведенні двигунів на стендах підприємства.

Економічний ефект від модернізації ГТД GT25000 і GT3000, розрахований на основі зменшення плати за викиди в атмосферу NO_x і CO , складе відповідно 17250 і 3600 грн на один двигун за рік.

ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі представлено нове розв'язання задачі прогнозування і поліпшення екологічних характеристик суднових газотурбінних двигунів шляхом оптимізації геометричних і режимних параметрів їх камер згоряння на базі створеної реакторної моделі утворення і розкладання забруднюючих речовин.

2. Для опису процесів високотемпературного горіння в ГТД вперше використана кінетична схема, заснована на детальному опису хімічних реакцій окиснення природного газу, яка містить 892 реакції з 113 компонентами, у тому числі вищі вуглеводні, зокрема ароматні.

3. Створено математичну модель утворення і розкладання токсичних компонентів у камерах згоряння суднових ГТД на базі теорії гомогенних і проточних реакторів (реакторна модель). Її адекватність перевірена шляхом експериментів на судовому і промисловому ГТД.

4. На основі узагальнення результатів теоретичних досліджень емісійних характеристик суднових і стаціонарних газотурбінних двигунів уточнені механізми утворення і розкладання оксидів азоту в Perezbidnennih паливоповітряних сумішах і показано, що зонна організація процесів сумішоутворення і горіння (малоемісійні камери згоряння) є ефективним засобом підвищення екологічної чистоти ГТД.

5. Запропоновано і реалізовано алгоритм розв'язання задачі оптимізації екологічних характеристик суднових ГТД методом випадкового пошуку з урахуванням хімічного складу і концентрації відпрацьованих газів двигуна у конкретних умовах його експлуатації, у якому в якості цільової функції використаний сумарний фактор токсичності на виході з первинної зони камери згоряння. Розрахункові оптимальні значення концентрацій оксидів вуглецю й азоту на вихлопі двигуна GT3000 на номінальному режимі його роботи менше експериментальних (з неоптимізованою камерою) у 1,9 і 6,6 рази, а на холостому ході - у 8,2 і 3,0 рази.

6. Теоретично визначені й експериментально підтверджені раціональні співвідношення між витратами палива через перший і другий канали пальникового пристрою газотурбінного двигуна GT3000, що забезпечують викиди оксидів азоту і вуглецю 131... 134 і 257... 10 мг/нм³ відповідно при зміні режимів його роботи від 0,7 до номінального, що задовольняє вимогам нормативних документів.

7. Організація малоемісійного горіння за технологією ROOL ("багате" горіння - швидке розведення - "бідне" горіння) і оптимізація параметрів камери згоряння судового ГТД GT25000 дозволяє знизити викиди оксидів азоту на номінальному режимі його роботи з 429 до 133,5 мг/нм³.

8. Результати дисертаційної роботи використовуються на ДП "Науково-виробничий комплекс газотурбобудування "Зоря"- "Машпроект" у вигляді рекомендацій при проектуванні і доведенні перспективних малотоксичних камер згоряння ГТД, а також у навчальному процесі УДМТУ при читанні курсів лекцій і виконанні курсових і дипломних проектів за спеціальностями "Турбіни" і "Екологія і охорона навколишнього середовища".

9. Розрахунковий економічний ефект від зменшення плати за забруднювачів в атмосферу при модернізації судового газотурбінного двигуна GT25000 і двигуна GT3000 газоперекачувального агрегату складає відповідно 17250 і 3600 грн на один двигун за рік.

Основні результати дисертації опубліковані в наукових спеціалізованих виданнях:

1. Романов В.И., Сербии СИ., Захаров Ю.В. Анализ методов снижения и прогнозирования вредных выбросов судовых газотурбинных установок // Збірник наукових праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 2000. - № 3 (369). - С.92-103.

2. Сербин С.И., Ванцовский В.Г., Захаров Ю.В. Исследования экологических характеристик газотурбинного двигателя GT3000 // Збірник наукових праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 2002. - № 3 (381). - С.70-77.

3. Сербин С.И., Ванцовский В.Г., Захаров Ю.В. Эмиссионные характеристики газотурбинного двигателя с системой впрыска воды в камеру сгорания // Збірник наукових праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 2002. - № 8 (386). - С.54-59.

4. Сербин С.И., Захаров Ю.В. Математическая модель образования и разложения загрязняющих веществ в газотурбинных двигателях // Збірник наукових праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 1999. - № 5 (365). - С.59-69.

5. Сербин С.И., Захаров Ю.В. Особенности оптимизации экологических параметров газотурбинного двигателя на номинальном режиме // Збірник наукових праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 2002. - № 5 (383). - С.82-90.

Основні публікації, у яких додатково викладений зміст дисертації:

6. Романовський Г.Ф., Сербин С.И., Захаров Ю.В. Реакторна модель утворення забруднюючих речовин у камері згоряння ГТУ // Розділ 4 в навчальному посібнику Романовського Г.Ф., Сербіна С.И. Екологічно чисті камери згоряння газотурбінних установок, Миколаїв: УДМТУ, 2002. - С.67-80.

7. Сербин С.И., Захаров Ю.В. Кинетика утворення пірогенних забруднень в паливоспалюючих пристроях // Наукові праці: Збірник. - Миколаїв: МФ НаУ-КМА, 2001. - Т. 11: Екологія. - С.77-81.

8. Сербин С.И., Захаров Ю.В. Моделирование образования загрязняющих веществ в газотурбинных установках // Проблемы энергосбережения и экологии в судостроении: Материалы 3-й Междун. науч.-техн. конф. - Николаев: УДМТУ, 2002. - С. 125-126.

9. Serbin S.I., Zakharov Y.V. The Mathematical Model of Liquid Fuel Gasification in a Plasma-Chemical Reactor // Proceedings of the Int. Conference on Modeling and Simulation MS'2001. - Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2001. - P.328-331.

Авторська участь у загальних публікаціях полягає в наступному: аналізі методів зниження токсичних компонентів у судових ГТД [1], обробці й узагальненні експериментальних даних по екологічних характеристиках двигунів з зонною камерою й впорскуванням води [2,3], розробці математичної моделі утворення і розкладання забруднювачів [4,6,7], обґрунтуванні цільової функції при розв'язанні задачі оптимізації екологічних характеристик судових ГТД [5], виборі параметрів систем екологічно чистого спалювання вуглеводневих палив [8,9].

АНОТАЦІЯ

Захаров Ю.В. Прогнозування і поліпшення екологічних характеристик судових газотурбінних двигунів.

Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.05 - судові енергетичні установки. - Український державний морський технічний університет імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2003.

У дисертаційній роботі представлено нове розв'язання задачі прогнозування й поліпшення екологічних характеристик судових газотурбінних двигунів шляхом оптимізації геометричних і режимних параметрів їх камер згоряння на базі створеної реакторної моделі утворення і розкладання забруднюючих речовин.

На основі аналізу результатів теоретичних і експериментальних досліджень запропоновані основні напрямки зниження токсичності вихлопних газів газотурбінних двигунів, що дозволяють організувати повне спалювання рідких і газоподібних палив і обмежити забруднення атмосфери.

Встановлено закономірності кінетичної схеми високотемпературного горіння органічного палива, яка містить в собі 892 хімічні реакції з 113 компонентами.

Визначено залежності зміни концентрацій стабільних і проміжних продуктів по довж зонної камери згоряння на різних режимах її роботи. Проведено оптимізацію екологічних характеристик судових газотурбінних двигунів методом випадкового пошуку з використанням в якості цільової функції сумарного фактора токсичності на виході з первинної зони камери згоряння.

Результати роботи можуть бути використані при модернізації існуючих і проектуванні нових малотоксичних камер згоряння газотурбінних двигунів.

Ключові слова: судові енергетичні установки, камера згоряння, утворення оксидів азоту, оптимізація екологічних характеристик.

АННОТАЦИЯ

Захаров Ю.В. Прогнозирование и улучшение экологических характеристик судовых газотурбинных двигателей.

Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.05 - судовые энергетические установки. - Украинский государственный морской технический университет имени адмирала Макарова, Николаев, 2003.

В диссертационной работе представлено новое решение задачи прогнозирования и улучшения экологических характеристик судовых газотурбинных двигателей путем оптимизации геометрических и режимных параметров их камер сгорания на базе созданной реакторной модели образования и разложения загрязняющих веществ.

Применение газотурбинных установок является одним из перспективных направлений совершенствования судовых и стационарных энергетических систем. В связи с этим последнее десятилетие характеризуется особенно интенсивным развитием газотурбостроения в развитых в техническом отношении странах мира, в том числе и в Украине.

На основе анализа результатов многочисленных теоретических и экспериментальных исследований выработаны основные концепции методов снижения токсичности выхлопных газов ГТД, которые позволяют организовать полное сжигание жидких и газообразных топлив и резко ограничить загрязнение атмосферы.

В работе впервые обоснована теоретическая модель прогнозирования процессов образования пирогенных загрязнителей в малоэмиссионной камере сгорания судового ГТД, базирующаяся на теории гомогенных и проточных реакторов. Установлены закономерности кинетической схемы высокотемпературного горения органического топлива, включающей в себя 892 химические реакции со 113 компонентами, с учетом особенностей протекания реакций взаимодействия высших углеводородов с азотосодержащими соединениями.

Численными методами определены зависимости изменения концентраций стабильных и промежуточных продуктов по длине зонной камеры сгорания на различных режимах ее работы, которые могут быть полезными при разработке и экспериментальной доводке судовых малоэмиссионных топливосжигающих устройств.

На основе обобщения результатов теоретических исследований эмиссионных характеристик судовых и стационарных газотурбинных двигателей уточнены механизмы образования и разложения оксидов азота в переобедненных топливовоздушных смесях и показано, что зонная организация процессов смесеобразования и горения (малоэмиссионные камеры сгорания) является эффективным средством повышения экологической чистоты ГТД.

Оптимизация экологических характеристик судовых ГТД производилась методом случайного поиска с учетом химического состава и концентрации отработавших газов в конкретных условиях эксплуатации двигателя с использованием в качестве целевой функции суммарного фактора токсичности на выходе из первичной зоны камеры сгорания.

Результаты диссертационной работы используются на ГП "Научно-производственный комплекс газотурбостроения "Зоря"- "Машпроект" в виде рекомендаций при проектировании и доводке перспективных малотоксичных камер сгорания ГТД, а также в учебном процессе

УГМТУ при чтении курсов лекций и выполнении курсовых и дипломных проектов по специальностям "Турбины" и "Экология и охрана окружающей среды".

Ключевые слова: судовые энергетические установки, камера сгорания, образование оксидов азота, оптимизация экологических характеристик.

SUMMARY

Zakharov Y.V. Forecasting and improvement of ecological characteristics of marine gas turbine engines.

The manuscript. A thesis for a degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.08.05 - marine power plants. - Ukrainian State Maritime Technical University named of admiral Makarov, Mikolayiv, 2003.

In dissertational work the new decision of a problem of forecasting and perfection, of ecological characteristics of marine gas turbine engines by optimization of geometrical and regime parameters of their combustors on the basis of created reactor model of formation and decomposition of polluting substances is developed.

Laws of the kinetic scheme of high-temperature burning of the organic fuel, including 892 chemical reactions with 113 components, are established.

Dependences of concentration change of stable and intermediate products on length of the chamber of combustion on various modes are determined.

Results of work can be used at modernization and new designing low toxic gas turbine engine combustors.

Key words: marine power plants, chamber of combustion, nitric oxide formation, ecological characteristics optimization.