

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

МАРИНЕЦЬ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.43

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ВИКОРИСТАННЯМ
АЕРАЦІЙНИХ ПЛАЗМОХІМІЧНИХ ПРИСТРОЇВ**

Спеціальність 05.08.05 - суднові енергетичні установки

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

Миколаїв-2002

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 Романов Віктор Іванович, Центр науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт «Машпроект», ведучий конструктор

-доктор технічних наук, професор Селезнев Юрій Володимирович, Миколаївська державна аграрна академія, професор кафедри тракторів та сільськогосподарських машин

Провідна установа - Одеська державна морська академія Міністерства освіти і науки України

Захист відбудеться «18» 06. 2002 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 «16» 05.2002 р.

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

Квасницький В.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Економічність і безпека експлуатації суднових енергетичних установок (СЕУ) у значній мірі визначаються ефективністю процесів горіння. На режимах часткових навантажень органічне паливо використовується найменш раціонально. Дуже гостро ця проблема стоїть у всережимних газотурбінних установках (ГТУ) і котлоагрегатах.

Резерви удосконалювання традиційної суднової техніки спалювання палив практично вичерпані. Тому у світовій науці і практиці явно позначився перехід до більш прогресивних технологій використання органічних палив, актуальність впровадження яких зростає в міру посилення екологічних вимог.

В дисертаційній роботі одержав подальший розвиток новий підхід до організації робочих процесів у паливоспалюючих пристроях. Заснований на принципах аерації горючих сумішей і плазмохімічній інтенсифікації горіння, він дозволяє не тільки здійснити прямий вплив на коефіцієнт повноти згоряння палива, але й побічно отримати при цьому відчутне підвищення ефективності термодинамічних циклів СЕУ в цілому. Концептуальне рішення комплексу існуючих задач при спалюванні рідких і газоподібних палив, досягнуте застосуванням запропонованих аераційних плазмохімічних пристроїв, має важливе наукове і практичне значення для суднової і суміжних галузей енергетики.

Зв'язок із науковими планами і програмами. Матеріали, подані в дисертаційній роботі, є складовою частиною комплексних досліджень по створенню вперше у світовій практиці суднового енергомашинобудування систем плазмохімічної інтенсифікації горіння, проведених на кафедрі турбін та у відділі підготовки та спалювання палив УДМТУ (МКІ).

Дисертаційна робота виконувалася у відповідності з наступними координаційними планами і програмами: загально академічною програмою фундаментальних досліджень із проблем транспорту на 1989-2000 рр. (шифр 4.3.8); державною науково-технічною програмою «Ресурсозбереження» на 1992-1994 рр. (шифр 5.1.1); науково-технічною програмою Держкомітету України з питань науки і технологій на 1993-1996 рр., переліком Міністерства освіти і науки України «Основні напрямки фундаментальних досліджень на 1999-2001 рр.» (напрямок 4 «Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології»).

Ціль і задачі роботи. Ціллю роботи є комплексне поліпшення економічних, екологічних і експлуатаційних характеристик суднових газотурбінних двигунів (ГТД) і котлів застосуванням аераційних плазмохімічних пристроїв (ПХП), що забезпечують більш ефективне спалювання палив на режимах запуску і малих навантажень. Досягнення зазначеної цілі обумовило необхідність розв'язування наступних задач: аналізу схемних рішень застосування плазмохімічних пристроїв у суднових камерах згоряння і топках; вибору ефективних способів організації периферійного підведення плазми в плазмохімічних пристроях; виконання теоретичної оцінки впливу геометричних і режимних параметрів на ефективність роботи ПХП нових схем; створення пальникових пристроїв і модельних камер згоряння для експериментальних досліджень ПХП; виробітки рекомендацій по вибору параметрів і проектуванню ПХП нових схем; впровадження результатів проведених досліджень.

Об'єктом досліджень є суднові газотурбінні і котельні установки, промислові котельні установки, що працюють на рідкому і газоподібному паливі. **Предметом** - робочий процесу системі «аераційний плазмохімічний пристрій - камера згоряння (топка)».

Методи досліджень. Комплексне підвищення ефективності СЕУ застосуванням аераційних плазмохімічних пристроїв для спалювання палив забезпечено теоретико-експериментальним рішенням дослідницьких задач на

єдиній методологічній основі з використанням програмно-цільового підходу. Для теоретичного аналізу процесів у досліджуваних об'єктах використане числове моделювання. Структура факела аераційних плазмохімічних пристроїв вивчалася методом голографічної інтерферометрії. Продукти згоряння аналізувалися оптикоадсорбційним, фотоколориметричним і хроматографічним методами, дисперсність газорідних потоків вимірювалась седиментометричним методом. Теплові характеристики процесів визначалися за матеріально-енергетичним балансом. Постановка експериментів заснована на використанні загальної теорії моделювання, включаючи теорію подібності і планування експерименту, при обробці даних і перевірці гіпотез використано статистичний аналіз. Техніко-економічна оцінка розробок виконана методами термодинамічного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає:

- в обґрунтуванні принципово нової для СЕУ схеми організації процесу плазмохімічного реагування в коаксіальному пристрої з периферійним підведенням плазми і центральноосьовим підведенням палива;

- в одержанні вперше даних про вплив геометричних і режимних параметрів на ефективність роботи коаксіального пристрою плазмохімічної інтенсифікації горіння, які дозволили вивести критеріальні рівняння його вольт-амперної характеристики і теплової о ККД;

- в установленні вперше закономірностей генерування плазмового потоку з газодинамічною стабілізацією течії в криволінійному каналі плазмохімічного пристрою аксіального типу, що полягають в зменшенні асиметричності плазмового потоку його компенсаційним розширенням в заступній частині;

- в подальшому розвитку уявлень про фізичну модель факела аераційного плазмохімічного пристрою в частині взаємодії пограничного шару з супутним потоком на основі вперше отриманих експериментальних даних про структуру його концентраційних та температурних полів;

- у доповненні концепції і плазмохімічної інтенсифікації горіння палива в камері згоряння суднової о ГТД новими положеннями про ефективність схемних рішень її здійснення, що визначають умови найменш енергоємного плазмового впливу;

- у виявленні особливостей аерації горючих сумішей і нових закономірностей здійснення плазмохімічного впливу, які забезпечують сталість екологічних характеристик судових газотурбінних і котельних установок;

- у пропозиції на основі узагальнення отриманих теоретичних і експериментальних результатів нових наукових *положень*:

- 1.Необхідною умовою прояву ефекту плазмохімічної інтенсифікації горіння основного палива в паливоспалюючому пристрої є організація взаємодії рециркуляційного потоку первинної зони горіння горючої суміші, яка промотується, з плазмохімічним факелом у перерізі, що відповідає ділянці його початково стабілізованої структури течії.

- 2.У плазмохімічних пристроях інтенсифікації горіння генерування плазмохімічного факела в процесі взаємодії коаксіального периферійного потоку плазми з центральним осьовим потоком палива енергетично більш вигідно в порівнянні з генеруванням факела в процесі взаємодії осьового потоку плазми з периферійним потоком палива.

- 3.Криволінійна схема плазмового пристрою аксіального типу, призначеного для роботи в автотурбінних режимах, може бути реалізована згином проточної частини на електродуговій ділянці при її профілюванні, адаптованому до структури заступної течії плазмового потоку.

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

обробкою отриманих даних, результатами натурних випробувань і дослідно-промислової експлуатації розроблених пристроїв.

Практичне значення отриманих результатів перебуває в розробці рекомендацій по вибору параметрів і схемних рішень організації робочого процесу в аераційних плазмохімічних пристроях і здійснення плазмохімічного впливу на робочі процеси в суднових газотурбінних камерах згоряння і котельних топках; у розробці базових конструкцій плазмохімічних пристроїв і систем на основі запропонованих способів і нових технічних рішень, захищених 3 авторськими свідоцтвами і патентом України; виробленню **рекомендацій** по використанню розроблених пристроїв для удосконалювання характеристик робочих процесів газотурбінних і котельних установок суднового і промислового призначення. **Впровадження результатів досліджень** здійснювалося в ході виконання науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт шляхом розробки рекомендацій по вибору параметрів і проектуванню плазмохімічних пристроїв і систем, а також передачі замовникам конструкторської документації і розробленої техніки. Всього за замовленням НВП «Машпроект» розроблено і виготовлено чотири зразки систем плазмохімічної інтенсифікації горіння для газотурбінних двигунів і за замовленням ВО «Зоря» - вісім зразків систем для промислових котлів.

Апробація роботи. Основні результати досліджень доповідалися й обговорювалися на науково-технічній конференції «Плазмове запалення і спалювання палив» (Миколаїв, 1989 р.), Міжнародному симпозиумі по теоретичній і прикладній плазмохімії (Рига, 1991 р.), XI, XIII Міжнародних симпозиумах по процесах горіння (Польща, Медзиздрое, 1989 р., Краків, 1993 р.), міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження й екології в суднобудуванні» (Миколаїв, 1996р., 1998 р.), «Плазмотехнологія-95,97» (Запоріжжя), конференціях професорсько-викладацького складу МКІ-УДМТУ (Миколаїв, 1986-2000 рр.), науково-технічних семінарах в ІТТФ НАНУ, ВО «Керчрибпром», УДМТУ та ін.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 18 друкованих наукових праць (із них 3 одноособові), у тому числі: 8 статей, 1 патент і 3 авторських свідоцтва на винаходи, 1 доповідь і 5 тез доповідей.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці теоретичних основ способу організації плазмохімічного горіння палива в супутному коаксіальному потоці плазми і створенні плазмохімічного пристрою для його реалізації. Основні наукові положення і результати випробувань плазмохімічних пристроїв різних типів отримані автором особисто. Участь автора в створенні і впровадженні систем плазмохімічної інтенсифікації горіння палив у якості відповідального виконавця робіт відбито в звітах про НДДКР (у тому числі по базовим для підготовки й представлення дисертації роботам № ГР-0180058056 та № ГР-01890011264), виконаних в УДМТУ в період із 1986 по 2001 рр. У спільних публікаціях особистий внесок автора конкретизований в уточненні до списку публікацій по темі дисертаційних досліджень. Особистий внесок автора підтверджують також 3 самостійні наукові публікації.

Структура й об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, п'ятих глав, висновків і рекомендацій, списку літератури з 190 найменувань і додатків. Робота містить 125 сторінок машинописного тексту, 14 таблиць і 68 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В вступі обґрунтована актуальність теми, обрані об'єкт і предмет досліджень, сформульовані ціль і основні задачі дисертаційної роботи, коротко викладені методологічні основи досліджень, наукова новизна і практична значимість роботи.

У **першому розділі** виконаний аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку техніки спалювання палив у судновій енергетиці. Показано, що основні проблеми спалювання палив у судових газотурбінних і котельних установках, генераторах інертних середовищ і інсинераторах мають подібний характер і для їх кардинального розв'язання необхідні нові підходи до організації робочих процесів. Дано короткий огляд дослідницьких програм ведучих організацій і фірм, що займаються розробкою паливоспалюючих пристроїв. Встановлено, що в сучасних розробках домінуючим є аераційний принцип організації горіння палива в потоці, що дозволяє не тільки збільшити коефіцієнт надлишку повітря локально в прифронтній зоні, але і підвищити якість сумішоутворення в цілому. Для компенсації виявлених вад аерації обґрунтована необхідність застосування додаткових засобів інтенсифікації.

З різноманіття існуючих методів інтенсифікації горіння перевага віддана плазмохімічному, як найбільш перспективному. Проаналізовано відомі до початку даної роботи судові плазмохімічні пристрої, розкриті їх переваги і недоліки, зазначені можливі напрямки їх удосконалювання і розвитку, у тому числі і з метою застосування разом з аераційними засобами. Обґрунтовано необхідність створення для судової енергетики плазмохімічних пристроїв нових схем: із периферійним підведенням плазми і з осьовим підведенням у криволінійному каналі. Сформульовано основні задачі досліджень.

В **другому розділі** подані результати теоретичного дослідження ефективності аераційних плазмохімічних пристроїв інтенсифікації горіння палив у СЕУ.

Теоретичний аналіз виконаний методами числового моделювання. У об'єктах, що моделюються, основні процеси в багатокомпонентному турбулентному хімічно реагуючому потоці описані системою рівнянь нерозривності, збереження кількості руху, енергії і маси. Вихідні рівняння, усереднені методами Рейнольдса за спеціальною процедурою у версії Сполдінга-Патанкара, перетворені в систему диференціальних рівнянь у часткових похідних, які описують суцільне середовище для середніх величин і їх пульсацій, і з метою зручності числового розв'язання приведені до однакового канонічного вигляду і записані в звичайних для осесиметричних течій циліндричних координатах z і r :

$$a_{\varphi} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\varphi \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\varphi \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[b_{\varphi} \frac{\partial}{\partial z} (c_{\varphi} \varphi) \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[b_{\varphi} \frac{\partial}{\partial r} (c_{\varphi} \varphi) \right] + d_{\varphi} = 0, \quad (1)$$

де φ - будь-яка з залежних змінних, у якості яких можуть бути прийняті напруженість вихору ω , функція току ψ , тангенціальна складова швидкості V_{θ} , коефіцієнт суміші f , масова частка палива $m_{\text{пал}}$; коефіцієнти a_{φ} , b_{φ} , c_{φ} , d_{φ} - джерельні члени, які моделюють фізичні та хімічні процеси.

Система диференціальних рівнянь у часткових похідних еліптичного виду (1) разом із граничними умовами чисельно вирішувалася широко поширеним ітераційним методом Гауса-Зейделя. Область інтегрування і граничні умови показані на рис. 1, де ПП і Пал - потоки плазмоутворюючого повітря і палива; d_k , d_4 , d_3 , $d_{\text{пал}}$ - діаметри відповідно катодного вузла, реакційної камери (РК), плазмового і паливного каналів. У поданому варіанті схема відповідає пристрою з периферійним підведенням плазми, а при $d_k = d_{\text{пал}} = 0$ - з осьовим підведенням.

Адекватність моделі досліджуваним процесам на етапі апріорної верифікації підтверджена кореляційним аналізом результатів моделювання і зіставних з ними розрахункових і експериментальних даних, опублікованих у роботах Абрамовича Г.М., Афросімової В.М., Будунова М.Ф., Жукова М.Ф., Книша Ю.О., Спейше-ра В.О., Ригпсіаіа А.К. та ін.

Результати числового моделювання процесів у суднових ПХП інтерпретовані в такий спосіб.

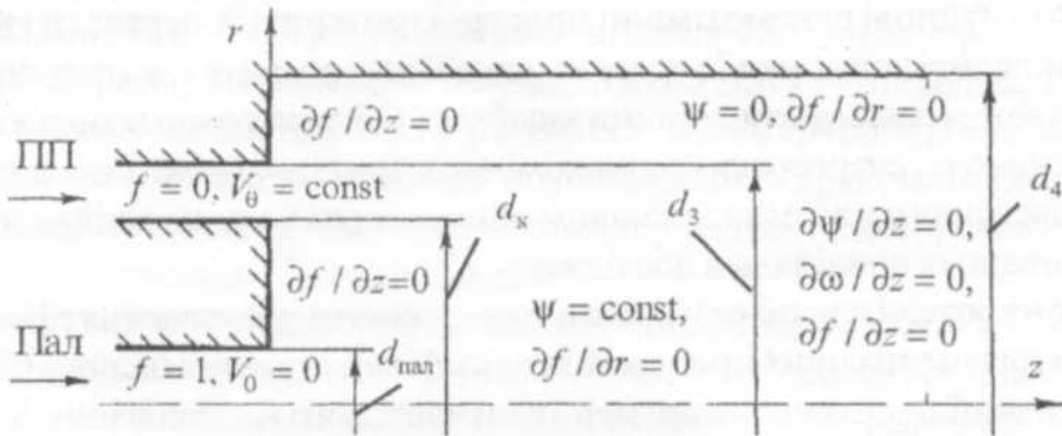


Рис. 1. Область інтегрування і граничні умови для реакційної камери ПХП

З розглянутих плазмових пристроїв, потенційно придатних для реалізації в СЕУ процесів реагування палива з периферійним супутнім потоком плазми: тангенціальних плазмових реакторів, плазмових генераторів тороїдального і коаксіального типів, - останні мають найбільшу ефективність. Для прикладу на рис.2 подані залежності масових часток палива від відносного радіуса РК прийнятих до моделювання пристроїв. При $d_3/d_4 < 1$ розрахункова схема еквівалентна коаксіальному плазмохімічному пристрою (КПХП), при $d_3/d_4 = 1$ - двом іншим із зазначених вище. Видно, що КПХП має найбільшу інтенсивність витрати палива, яка зростає зі зменшенням d_3/d_4 . Внаслідок конструктивних обмежень, наявних у суднових паливоспалюючих пристроях, прийнято мінімальне значення $d_3/d_4 = 0,6$.

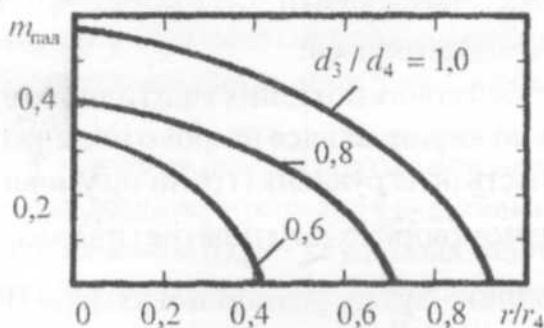


Рис.2. Розподіл палива у вихідному перерізі реакційної камери з периферійним підведенням плазми

Найбільш раціонально процеси в ПХП протікають на турбулентних режимах із закруткою течії при співвідношенні тангенціальних і осьових складових швидкості $V_\theta/V_z = 1-3$. Основними умовами ефективного функціонування КПХП є: витрата плазмоутворюючого повітря $G_{\text{пл}} = 1-5$ г/с, відношення $l_4/d_4 = 0,8-1,2$ і $d_3/d_4 = 0,70-0,85$ (l_4 - довжина РК). Аналогічною умовою для аксіального плазмохімічного пристрою криволінійної схеми (АПХП) є співвідношення діаметрів електродугового і плазмового каналів у межах $d_2/d_3 = 0,6-0,8$.

При виконанні зазначених умов у суднових ПХП може бути використаний газодинамічний спосіб стабілізації горіння дуги замість звичайно застосовуваного в існуючих плазмових пристроях електромагнітного.

У **третьому розділі** подані результати експериментальних досліджень суднових аераційних плазмохімічних пристроїв. Викладено сутність програмно-цільового підходу до їх організації і планування. Приведено описи експериментальних установок, розроблених пристроїв, методик досліджень і обробки результатів. Всі експериментальні дослідження виконані в натурних умовах, основні результати полягають у наступному.

Експериментально підтверджена можливість створення коаксіальних і криволінійних аксіальних ПХП із газодинамічною стабілізацією горіння електричної дуги. Принципові схеми розроблених пристроїв приведені на рис.3.

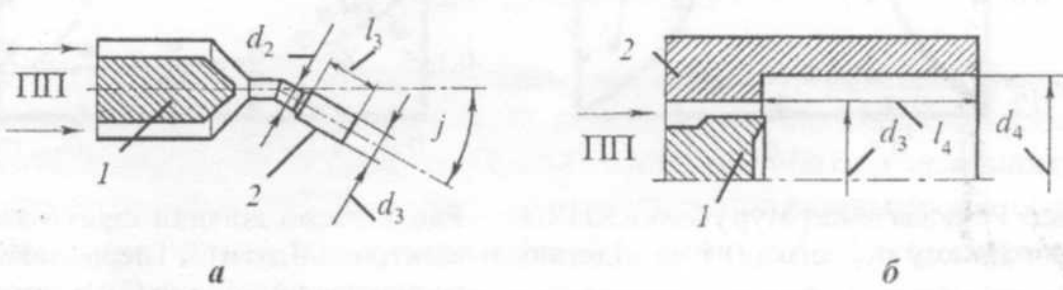
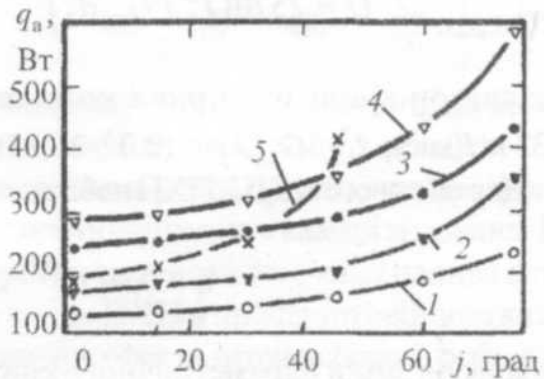


Рис.3. Принципові схеми проточних частин АПХП криволінійної схеми (а) і КПХП (б): 1 - катод; 2 - анод

Найважливіша проблема створення криволінійного АПХП, яка перебуває в мінімізації теплового потоку в анод q_a , вирішена вибором раціонального місця згину анода і визначальних параметрів. При цьому, як видно з рис.4, прийнятна при $G_{\text{гн}} \geq 0,5$ г/с працездатність забезпечена при кутах згину осі анода j до 60° для різних струмів дуги I .

Рис.4. Залежність теплового потоку від кута згину осі анода:

1 - $I = 4$ А, $G_{\text{гн}} = 1$ г/с; 2 - $I = 4$ А, $G_{\text{гн}} = 0,5$ г/с; 3 - $I = 9$ А, $G_{\text{гн}} = 1$ г/с; 4 - $I = 8$ А, $G_{\text{гн}} = 0,5$ г/с; 5 - $I = 4$ А, $G_{\text{гн}} = 0,25$ г/с



У ході створення КПХП основна увага приділялася формуванню необхідної структури потоку в РК. У підсумку інтенсивність протікання робочих процесів була отримана практично на розрахунковому рівні. Це видно, наприклад, із приведеного на рис.5 розподілу в плазмохімічному факелі безрозмірних температур $\delta T / \delta T_m = (T - T_c) / (T_m - T_c)$, де T , T_c , T_m - температура в точці факела, навколишньому середовищі і максимальна в перерізі. Надійність функціонування в необхідному для суднових КПХП діапазоні параметрів досягнута профілюванням проточної частини, що забезпечує стабільність відносної довжини периферійної рециркуляційної зони l/d_4 у межах якої здійснюється переважне шунтування електричної дуги (рис.6).

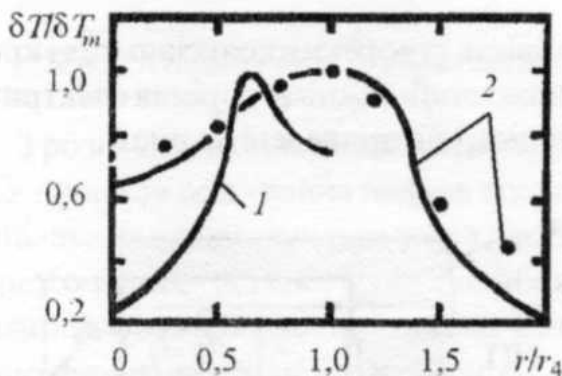


Рис.5. Розподіл температур у факелі КПХП у вихідному перерізі (1) і на відстані 80 мм від сопла (2): • - експеримент (пропан-бутан); — - розрахунок

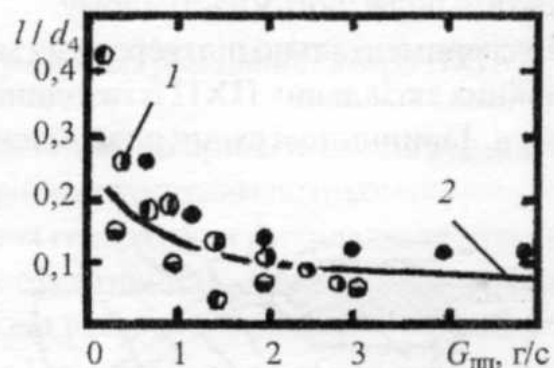


Рис.6. Межа ділянки шунтування електричної дуги (1) і периферійної рециркуляційної зони (2): о - експеримент; — - розрахунок

Основні характеристики ПХП відповідно до теорії подібності плазових процесів узагальнені критеріальними залежностями.

Підсумкове рівняння для вольт-амперної залежності КПХП подано в явному, розв'язаному щодо напруги дуги, вигляді

$$U = 2570 \left(I^2 / G_{\text{пл}} d_3 \right)^{-0,11} (G_{\text{пл}} / d_3)^{0,41} (d_4 / d_3)^{0,22}, \quad (2)$$

де діапазон зміни розмірних комплексів: $d_4 / d_3 = 1,67-1,11$; $G_{\text{пл}} / d_3 = 0,02-0,33 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$; $I^2 / G_{\text{пл}} d_3 = (0,32-26,13) \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с/(кг}\cdot\text{м)}$.

Для теплового ККД КПХП наближене критеріальне рівняння отримане у вигляді:

$$\eta = 0,89 I^{-0,05} G_{\text{пл}}^{0,10} (l_4 / d_4)^{-0,04}, \quad (3)$$

де діапазон зміни параметричного критерію $l_4 / d_4 = 0,4-2,0$.

У діапазоні зміни визначальних параметрів $d_3 = (12-24) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $I = 5-15 \text{ А}$,

$G_{\text{пл}} = (0,5-5,0) \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ рівняння (2) і (3) справедливі із середньою похибкою відповідно ± 7 і $\pm 4 \%$, максимальною ± 15 та $\pm 10 \%$ (рис.7).

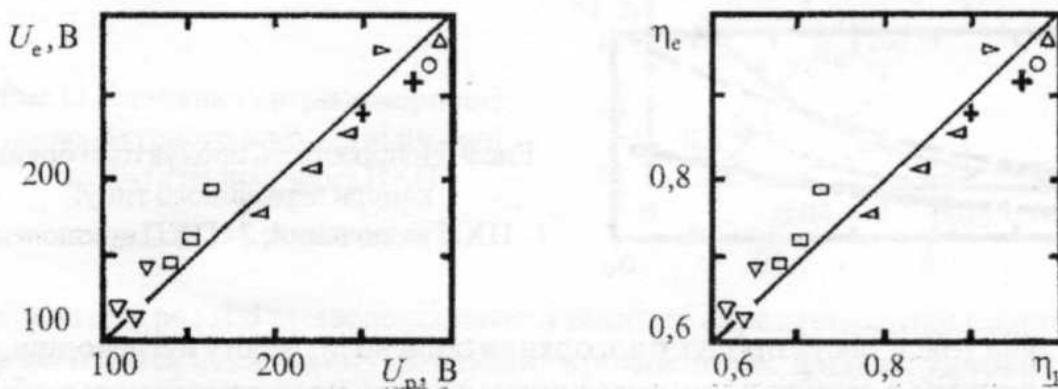
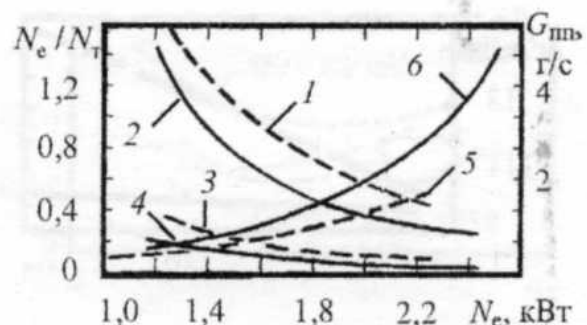


Рис.7. Порівняння розрахункових значень напруги і теплового ККД (U_p, η_p) з експериментальними (U_e, η_e)

КПХП має в 1,3-2,4 рази меншу енергоємність і в 1,4-1,7 рази більшу витрату плазмоутворюючого повітря, ніж АПХП, що забезпечує більш широкий робочий діапазон. З приведених на рис. 8 даних, отриманих при роботі на дизельному паливі при струмі дуги $I = 10 \text{ А}$, видно, що найбільш сприятливі співвідношення витрат повітря і палива, а також електричної N_e і теплової N_T потужності плазмохімічного факела спостерігаються при великих значеннях коефіцієнта надлишку повітря $\alpha_{\text{п}}$.

Рис.8. Характеристики суднових плазмохімічних пристроїв:
 --- аксіального типу; — ко-аксіального типу; 1,2 - N_e / N_T ($\alpha_{\text{п}} = 1,0$); 3 - N_e / N_T ($\alpha_{\text{п}} = 0,1$); 4 - N_e / N_T ($\alpha_{\text{п}} = 0,05$); 5,6 - $G_{\text{пл}}$ ($I = 10 \text{ А}$)



У четвертому розділі поданий опис модельних і серійних суднових камер згоряння, викладені результати випробувань аераційних ПХП у їх складі.

В результаті виконаного комплексу досліджень уточнені уявлення про фізичну модель факела ПХП і закономірності його поширення в камері згоряння. На підставі аналізу пуско-зривних характеристик і повноти згоряння палива встановлено, що найбільш кращим є розташування ПХП в

прифронтівій зоні камери. Визначено, що необхідною умовою прояву ефекту інтенсифікації робочого процесу є безпосередній контакт первинно стабілізованої ділянки факела ПХП з основною рециркуляційною течією.

Плазмохімічний вплив підвищує якість горіння. При цьому зменшується недопал палива й інтенсивність нагаровідкладень. Непрозорість продуктів згоряння N (рис.9) знижується в 1,6-1,8 рази в порівнянні з режимами звичайного горіння.

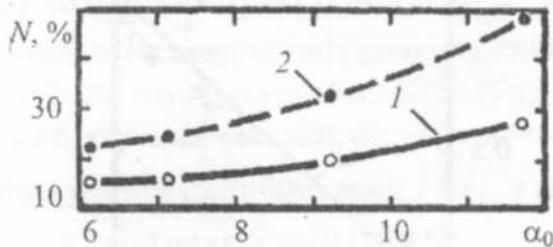


Рис.9. Непрозорість продуктів згоряння камери аераційного типу:
1 - ПХП включений; 2 - ПХП виключений

Загальна токсичність продуктів згоряння оцінена по вмісту вуглеводнів, монооксиду вуглецю й оксидів азоту показником сумарного питомого нормообміну

$$q_n = \sum (c_i V_r / \text{ГДК}_i G_{\text{пал}} Q_n^H),$$

де V_r - об'ємна витрата продуктів згоряння; c_i , ГДК_i - обмірювана і гранично допустима концентрація речовини i ; $G_{\text{пал}}$, Q_n^H - витрата і нижча наявна теплота згоряння палива.

З рис.10 видно, що розрахований зазначеним способом показник питомого нормообміну q_n при включенні АПХП зменшується в 1,1-1,5 рази в діапазоні зміни загального коефіцієнта надлишку повітря в камері згоряння $\alpha_0 = 7,5-11,9$.

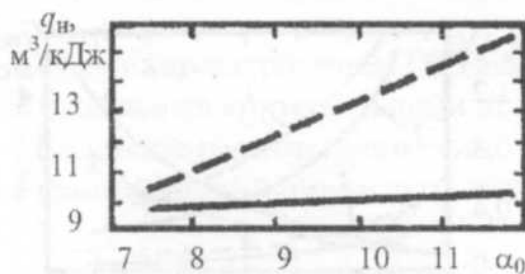
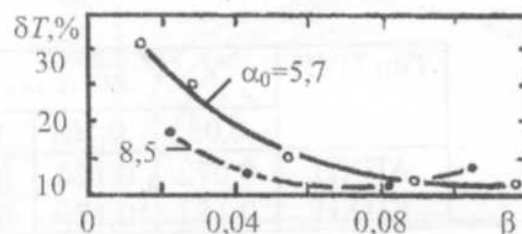


Рис.10. Екологічні характеристики аераційної камери згоряння:
— АПХП включений;
--- АПХП виключений

Проведено дослідження впливу основних параметрів на характеристики плазмохімічної аерації. Масштабний фактор оцінювався співвідношенням діаметрів реакційної камери ПХП й отворів жарової труби, що подають повітря в первинну зону горіння. При його значенні 0,4-0,7 забезпечується найбільш широкий робочий діапазон. Найважливішим режимним фактором є відносна витрата палива $\beta = G_{\text{пал.п}} / G_{\text{пал}}$ через ПХП, де $G_{\text{пал.п}}$ - витрата палива через ПХП, $G_{\text{пал}}$ - витрата основного палива. Її вплив на нерівномірність температурного поля аераційної камери згоряння показаний на рис.11. Видно, що при добавках продуктів ПХП в залежності від коефіцієнта надлишку повітря в камері α_0 нерівномірність температурного поля (при початковому рівні відповідно 27 і 39 %) зменшується в 1,2-3,5 рази, досягаючи найменших значень при $\beta = 0,05-0,10$.

Рис.11. Залежність нерівномірності температурного поля від відносної витрати палива через ПХП

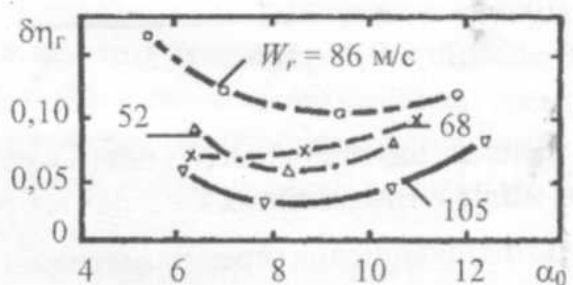


У п'ятому розділі приведені основні технічні характеристики розроблених при участі автора дослідних і дослідно-промислових зразків суднових систем плазмохімічного горіння палив, основними елементами яких є плазмохімічні пристрої і джерела електроживлення.

Подано також результати випробувань розроблених зразків у лабораторних умовах УДМТУ, на стендах підприємств у складі серійних камер згоряння й у натурних умовах, показані їх ефективність і перспективи застосування в суднових і інших енергетичних установках.

На основі криволінійного аксіального пристрою розроблена аераційна плазово-паливна форсунка (АППФ). Результати іспитів подані на рис. 12. У залежності від швидкості втікання повітря в отвори жарової труби W_r приріст коефіцієнта повноти згоряння палива при включенні плазмотрона АППФ складає від 3-5 до 10-18%.

Рис.12. Приріст коефіцієнта повноти згоряння палива в газотурбінній камері аераційного типу при включенні плазмотрона АППФ



Результати випробувань розроблених ПХП в складі модельної топки подані в табл. 1. Видно, що у всьому діапазоні випробуваних режимів топки по витраті палива від 0,05 до 0,60 від номінального $G_{\text{пал}}^{\text{ном}}$ плазмохімічні пристрої забезпечують стабільний приріст коефіцієнта повноти горіння $\delta\eta_g$ на 0,5-17,9 %, причому більший за значенням - в області менших навантажень і при використанні КПХП. Діапазон регулювання топки по витраті палива при цьому розширюється в 1,2-1,7 рази. Натурні випробування розроблених пристроїв у складі суднового допоміжного котла типу КВВА-1,5/5 і промислових котлів типу ДЕ 25/14 підтвердили високу ефективність їх застосування.

Таблиця 1. Приріст коефіцієнта повноти горіння палива в котельній топці

Тип ПХП	Значення $\delta\eta_{\text{г}}$ при $G_{\text{пал}} / G_{\text{пал}}^{\text{ном}}$					
	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,60
АПХП	0,072	0,124	0,062	0,035	0,022	0,005
КПХП	0,153	0,179	0,132	0,091	0,058	0,009

На прикладі транспортних і промислових суден показана ефективність застосування плазмохімічних систем відповідно в складі газотурбінних установок і допоміжних котлів.

Розрахункова зміна приросту ККД нетто $\delta\eta_{\text{н}}$ суднової ГТУ М25 в залежності від відносної потужності установки $\bar{N}_e$ з урахуванням енерговитрат на функціонування плазмохімічної системи в порівнянні з вихідним варіантом (максимальна температура газу в циклі $T_3 = 1132 \text{ К}$, втрати тиску $\delta p = 0,04$) показана на рис. 13.

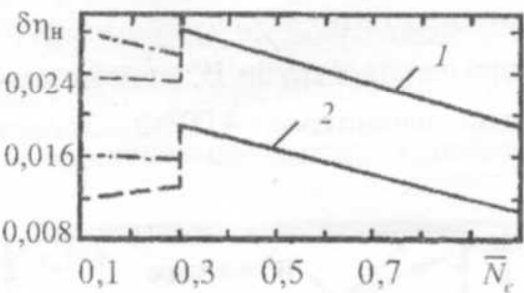


Рис. 13. Залежність зміни ККД нетто ГТУ М25 у результаті застосування аераційних пальників з ПХП:
----- АПХП включений; - - - - КПХП включений; ——— ПХП виключений;
1 - $T_3 = 1082 \text{ К}$, $\delta p = 0,040$;
2 - $T_3 = 1162 \text{ К}$, $\delta p = 0,025$

Видно, що приріст ККД нетто в результаті стабілізації дрейфу температурних полів у традиційних камерах згоряння складає 0,018-0,028 (крива 1); у результаті підвищення середньомасової температури T_3 за рахунок зменшення нерівномірності температурного поля в аераційних камерах - 0,011-0,019 (крива 2).

Ефективність застосування ПХП в типовому судновому допоміжному котлі паровидатністю 2500 кг/год оцінювалася по зміні ККД нетто котла з урахуванням зменшення теплових втрат за рахунок зменшення α_0 , економії енергії дуттьовим вентилятором та додаткових витрат енергії на електропостачання ПХП. Розрахункові залежності зміни ККД нетто від режиму роботи котла показані на рис. 14. Видно, що при використанні КПХП приріст ККД нетто $\delta\eta_{\text{н}}$ забезпечується у 1,5 рази більш високий (за рахунок меншого енергоспоживання) у порівнянні з АПХП:

якщо при використанні АПХП $\delta\eta_{\text{н}}^{\text{АПХП}} = 0,12\text{-}1,62\%$, то при використанні КПХП $\delta\eta_{\text{н}}^{\text{КПХП}} = 0,36\text{-}2,58\%$.

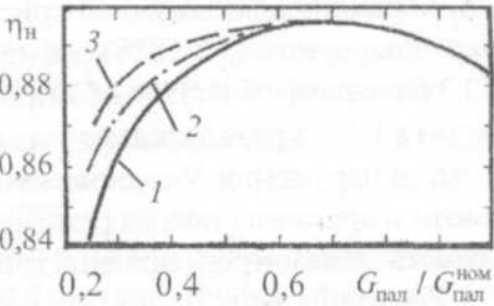


Рис. 14. Залежності ККД нетто суднового допоміжного котла від режиму роботи:
1 - вихідний варіант; 2 - АПХП; 3 - КПХП

З урахуванням побічних термодинамічних ефектів і прямого впливу на підвищення повноти згоряння палива на режимах застосування ПХП очікувана сумарна економія палива при типових відповідно для транспортних і промислових суден спектрах навантажень знаходиться на рівні 88 т/рік у судновому двигуні типу ДИ59 і на рівні 4-10 т/рік у допоміжному котлі.

Висновки

1. У дисертації подане нове рішення задачі підвищення ефективності спалювання палив на режимах запуску і малих навантажень суднових газотурбінних двигунів і котлів застосуванням у їх камерах згоряння і топках аераційних плазмохімічних пристроїв, які внаслідок багатфакторного прямого і побічного впливу на робочий процес забезпечують комплексне поліпшення економічних, екологічних і експлуатаційних характеристик СЕУ.

2. Обґрунтовано застосування в СЕУ принципово нових способів організації плазмохімічного горіння палива, для здійснення яких запропоновано використовувати плазмохімічні пристрої аксіального типу з периферійним підведенням палива й осьовим підведенням плазми, що генерується в криволінійному електродуговому каналі, і коаксіального типу з периферійним підведенням плазми й осьовим підведенням палива. Теоретично визначені конструктивні і режимні умови їх реалізації в суднових газотурбінних двигунах і котлах.

3. Вперше створені коаксіальний і криволінійний аксіальний плазмохімічні пристрої з газодинамічною стабілізацією горіння дуги. Експериментально визначені й у критеріальному вигляді узагальнені їх основні характеристики. У аксіальному пристрої забезпечена можливість генерування стаціонарного плазмового потоку в криволінійному каналі з кутом згину осі до 60°. У коаксіальному пристрої порівнянні з аксіальним енергоємність процесу генерування плазмохімічного факела знижена в 1,3-2,4 рази.

4. На підставі експериментальних даних, отриманих у модельних і натурних умовах, уточнені уявлення про фізичну модель факела аераційного плазмохімічного пристрою і його поширення в основному потоці камери згоряння. Як необхідна умова прояву ефекту інтенсифікації визначене безпосереднє контактування його первинно стабілізованої ділянки з зоною рециркуляції основної горючої суміші, а як найбільш доцільне рекомендоване його розташування в прифронтівій зоні камери згоряння.

5. Аераційні плазмохімічні пристрої суднових газотурбінних камерах згоряння підвищують на 3-18 % коефіцієнт повноти згоряння палива, зменшують у 1,2-3,3 рази коефіцієнт нерівномірності поля температур, у 1,6-1,8 рази непрозорість і в 1,1 -1,5 рази загальну токсичність продуктів згоряння в залежності від режимних параметрів. У суднових котельних топках вони збільшують коефіцієнт повноти згоряння палива на режимах часткових навантажень на 0,5-17,9 %, розширюють діапазон регулювання топки котла по витраті палива в 1,2-1,7 рази.

6. Реалізація запропонованої концепції організації процесів горіння палив у СЕУ підвищує їх термодинамічну ефективність. Розрахункове підвищення ККД нетто суднової ГТУ М 25 складає 1,1 -2,8 %, суднового допоміжного котла паро-видатністю 2500 кг/год -0,1 -2,6 %. Очікувана сумарна економія палива при типових спектрах навантажень відповідно для транспортних і промислових суден знаходиться на рівні 88 т/рік у судновому двигуні типу ДИ59 і на рівні 4-10 т/рік у допоміжному котлі.

7. Практичне значення виконаних досліджень підтверджено дослідно-промисловою перевіркою плазмохімічних систем інтенсифікації горіння палив, розроблених і виготовлених при особистій участі автора за замовленням НВП «Машпроект» для газотурбінних двигунів і ВО «Зоря» для промислових котлів.

Основні результати дисертації опубліковані в наукових спеціальних виданнях:

1. Романовский Г.Ф., Маринец АН., Овсянников В.Н. Анализ процессов пуска судовых котлов и исследование системы плазменного воспламенения топлива на модельной топке котла // Судовое машиностроение: Сб. науч. тр. - Николаев: НКИ, 1987. - С. 53-61.

2. Исследование эмиссии оксидов азота плазмохимическими реакторами судовых энергетических установок / Г.Ф. Романовский, В.М. Горбов, А.Н. Маринец, Ю.А. Шаповалов // Динамика и прочность судовых машин: Сб. науч. тр. - Николаев: НКИ, 19Х7. - С.50-55.

3. Романовский Г.Ф., Сербии СИ., Маринец А.Н. Эрозионный износ электродных материалов при малых токах дуги плазмотрона // Динамика и прочность судовых машин: Сб. науч. тр. - Николаев: НКИ, 1988. - С. 26-29.

4. Сербии СИ., Маринец А.Н. Характер распространения продуктов плазмохимического реактора в камере сгорания судового ГТД // Судовое енергомашиностроение: Сб. науч. тр. - Николаев: НКИ, 1990. - С.27-33.

5. Сербии СИ, Золотой Ю.Г., Маринец А.Н. Использование голографической интерферометрии для визуализации неоднородностей плазменного воздушного потока // Судовые энергетические установки: Сб. науч. тр. - Николаев: НКИ, 1991. - С.68-73.

6. Романовский Г.Ф., Сербии СИ., Маринец А.Н. Применение плазмохимической интенсификации горения для повышения эффективности топливосжигающих устройств. - Энергетик, 1996, № 1. - С. 6-7.

7. Маринец А.Н. Исследование эффективности и выбор схемных решений подвода плазменного потока в плазмохимических устройствах // 36. наук. пр. УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 1998,7(355). - С.128-133.

8. Сербии СИ., Маринец А.Н. Изучение структуры факела плазмохимических продуктов методом топографической интерферометрии. // 36. наук. пр. УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 2000,1(367). - С.67-73

Основні публікації, у яких додатково викладений зміст дисертації:

9. Некоторые исследования процесса горения натуральных топлив / Г.Ф. Романовский, И.Б. Матвеев, С.И. Сербин // Горение органического топлива: Материалы V Всесоюз. конф. - Новосибирск; ИТФ СОЛИ СССР. - 4.2. -1985. -С.167-171.

10. Маринец Л. Н. Возможности практического применения систем плазменного сжигания топлив // Плазменное воспламенение и сжигание топлив: Тезисы докл. науч.-техн. конф. - Николаев, 1989. - С.24-26.

11. Источники питания для систем і плазмохимической интенсификации горения/ Г.Ф. Романовский, СИ. Сербии, В.Н. Овсянников, А.Н. Маринец. -Междунар. симп. по теоретической и прикладной плазмохимии. - Рига, 1991. - С. 355-357.

12. А.с. 1694950 СССР, МКИ F01N 3/08. Способ нейтрализации отработавших газов двигателя внутреннего сгорания /Г.Ф. Романовский, СИ. Сербии, Ю.А. Шаповалов, А.Н. Маринец, Ю.Н. Сидельников. - Заявлено 20.10.88; Оpubл. 30.11.91. - Бюл.44.

13. А.с. 1726090 СССР, МКИ В 21 D 7/12. Способ сжигания топлива / С.И. Сербин, Г.Ф. Романовский, А.Н. Маринец, И.А. Ратушняк. -4713376/06. - Заявлено 03.07.89. -Оpubл. 15.04.92.-Бюл. 14.

14. А.с. 1793613 СССР, МКИ В 23 К 9/06. Источник тока для возбуждения и питания дуги/Г.Ф. Романовский, В.М. Рябенский, А.Н. Пусев, А.Н. Маринец. -4720693/08. - Заявлено 26.003.88. - Оpubл. 30.04.93. - Бюл. 16.

15. Romanovsky G.F., Serbin S.T., Marinetz A.N., Ovsyannikov V.N. Plasma-chemical Intensification of the Working Process in a Heat Boiler. - 13-th Int. Symposium on Combustion Processes: - Poland. - Cracow, 1993. - p.36.

16. Патент №3800. Україна. Джерело струму для збудження та живлення дуги. / Г.Ф. Романовский, СИ. Сербии, А.Н. Маринец. - Оpubл. 27.12.94. - Бюл. №6-1.

17. Маринец А.Н. Исследование нагарообразования в процессах плазмохимической интенсификации горения тяжелых топлив // Проблемы энергосбережения и экологии в судостроении: Тезисы докл. 1-й международной науч.-техн. конф. Николаев, 1996. - С.54-55.

18.Романовский Г.Ф., Сербии СИ., Маринец А.Н. Характеристики топки судового котла с системой плазмохимической интенсификации // Птазмотехнолошя-97: Сб. науч.тр. -Запорожье, 1997.-С.5-8.

Авторська участь у спільних публікаціях перебуває в аналізі проблем спалювання налив у судових котлах [1]; обґрунтуванні вибору конструкційних матеріалів, умов і факторів іспитів [3]; виборі параметрів і аналізі схемних рішень технічних пропозицій [9,11-14,16], у постановці і проведенні експериментів, аналізі [1-6,15,18] і узагальненні [6,8,18] отриманих результатів.

АНОТАЦІЯ

Маринець О.М. Підвищення ефективності судових енергетичних установок використанням аераційних плазмохімічних пристроїв.

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, 2002.

Ціллю дисертаційної роботи є комплексне поліпшення економічних, екологічних і експлуатаційних характеристик судових газотурбіни їх двигунів і котлів застосуванням у їх камерах згоряння і топках аераційних плазмохімічних пристроїв, що забезпечують більш ефективне спалювання палив на режимах запуску і малих навантажень.

Поставлена піль досягнута теоретико-експериментальним розв'язанням дослідних задач. Теоретично обґрунтовані й експериментально досліджені нові способи організації плазмохімічного горіння палива в СЕУ. Оцінено термодинамічну ефективність запропонованої концепції організації процесів горіння палив у СЕУ.

Ключові слова: судові енергетичні установки, паливоспалюючі пристрої, аерація, плазмохімічний метод.

АННОТАЦИЯ

Маринец А.Н. Повышение эффективности судовых энергетических установок использованием аэрационных плазмохимических устройств.

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, 2002.

Целью диссертационной работы является комплексное улучшение экономические, экологических и эксплуатационных характеристик судовых газотурбинных двигателей и котлов применением в их камерах сгорания и топках аэрационных плазмохимических устройств, обеспечивающих более эффективное сжигание топлив на режимах запуска и малых нагрузок. Объектом исследований являются судовые газотурбинные и котельные установки, промышленные котельные установки, работающие на жидком и газообразном топливе. Предметом - рабочий процесс в системе «аэрационное плазмохимическое устройство - камера сгорания (топка)».

В диссертационной работе развит новый подход к организации рабочих процессов в топливосжигающих устройствах, основанный на принципах аэрации горючих смесей и плазмохимической интенсификации горения. Поставленная цель достигнута теоретико-экспериментальным решением исследовательских задач.

Методами численного моделирования выполнен анализ схемных решений организации плазмохимического горения топлива в СЭУ. Установлено, что плазмохимическое реагирование в сиу гном потоке с периферийным подводом плазмы и осевым подводом топлива наиболее эффективно осуществляется в устройствах коаксиального типа. При

соответствующем профилировании проточной части и выборе режимных параметров в плазменных устройствах аксиального типа изгибом проточной части на дуговом участке может быть реализована криволинейная схема. Выполненный параметрический анализ плазмохимических устройств позволил выявить основные конструктивные и режимные условия их реализации в СЭУ.

Впервые созданы коаксиальное и криволинейное аксиальное плазмохимические устройства с газодинамической стабилизацией горения дуга. Экспериментально определены и в критериальном виде обобщены их основные характеристики. В аксиальном устройстве обеспечена возможность генерирования стационарного плазменного потока в криволинейном канале с углом изгиба оси до 60° . В коаксиальном устройстве по сравнению с аксиальным энергоемкость процесса генерирования плазмохимического факела снижена в 1,3-2,4 раза.

На основании экспериментальных данных, полученных в модельных и натурных условиях, уточнены представления о физической модели факела аэрационного плазмохимического устройства и его распространения в основном потоке горючей смеси, выявлены условия проявления эффекта интенсификации горения.

Аэрационные плазмохимические устройства в газотурбинных камерах сгорания повышают на 3-18% коэффициент полноты сгорания топлива, уменьшают в 1,2-3,3 раза коэффициент неравномерности поля температур, в 1,6-1,8 раза непрозрачность и в 1,1 -1,5 раза общую токсичность продуктов сгорания в зависимости от режимных параметров. В судовых котельных топках они расширяют диапазон регулирования по расходу топлива в 1,2-1,7 раза.

Применение предлагаемой концепции организации рабочего процесса в СЭУ повышает их топливную экономичность за счет как прямых эффектов от повышения полноты сгорания топлива на режимах применения плазмохимических устройств, так и косвенных, обусловленных термодинамическими преимуществами. Эффективность применения предложенных решений показана на примере транспортных и промысловых судов. Расчетное повышение КПД нетто судовой всережимной газотурбинной установки типа М25 составляет 1,1-2,8 %, судового вспомогательного котла паропроизводительностью 2500 кг/ч - 0,1 -2,6 %.

Практическое значение выполненных исследований подтверждено опытно-промышленной проверкой образцов плазмохимических устройств и систем интенсификации горения топлив, разработанных для газотурбинных двигателей и промышленных котлов.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, топливосжигающие устройства, аэрация, плазмохимический метод.

SUMMARY

Marinetz O.M. A heightening of efficiency of marine power plants using aerate plasma-chemical devices.

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, 2002.

The purpose of the dissertation is the complex improvement of economical, ecological and operating performances of marine gas turbines and boiler by application in their combustion chambers and furnaces aerate plasma-chemical devices ensuring more effective fuel combustion on start and small loading conditions.

The object in view is reached by the theoretical and experimental solution of research problems. New methods of organization of plasma-chemical fuel burning in marine power plants are theoretically justified and experimentally explored. The

thermodynamic efficiency for offered conception of organization of fuel combustion processes in power plants is evaluated.

Key words: marine power plants, combustors, aeration, plasma-chemical method.

**Підписано до друку 22.04.2002 р. Формат 60х90^іmm*.
Ум.друк.арк. 0,84. Обл.-вид.арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 173.
Видавництво УДМТУ, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова,5**