

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Гончарова Наталія Олександрівна

УДК 621.45.034

**УДОСКОНАЛЕННЯ МАЛОЕМІСІЙНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ
ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА, ЩО ПРАЦЮЄ НА ПРОДУКТАХ
ПЛАЗМОХІМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВУГІЛЛЯ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2015

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Сербін Сергій Іванович,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерство освіти і науки України, м. Миколаїв, директор Машинобудівного інституту НУК, завідувач кафедри турбін.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Варбанець Роман Анатолійович,
Одеський національний морський університет, Міністерство освіти і науки України, м. Одеса, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації.

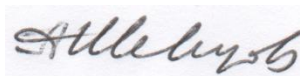
– кандидат технічних наук, доцент
Білоусов Євген Вікторович,
Херсонська державна морська академія, Міністерство освіти і науки України, м. Херсон, декан факультету суднової енергетики ХДМА, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки.

Захист відбудеться «06» липня 2015 р. о 12:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д38.060.01 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою:
ауд. 360, просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою:
просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025.

Автореферат розісланий «02» червня 2015 р.

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



А. П. Шевцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Проблема використання високозольного вугілля в енергетиці України та інших країн є актуальною, особливо у світлі зростаючих екологічних вимог до складу відхідних газів теплових електростанцій та інших виробництв, де здійснюється спалювання і переробка вугілля. Одним із способів вирішення цієї проблеми є використання технології попередньої плазмохімічної газифікації високозольного вугілля і подальшого спалювання одержуваного синтез-газу в газотурбінній установці з виробленням електроенергії та утилізацією теплоти на основних стадіях технологічного процесу.

Раціональна організація кожного з процесів (плазмохімічна газифікації вугілля і ефективного спалювання синтез-газу в камері згоряння ГТД) дозволяє підвищити ефективність перспективних комплексів з переробки кам'яного вугілля в синтез-газ і вироблення електроенергії газотурбінним агрегатом (ГТА), а досконалість організації процесу горіння продуктів плазмохімічної переробки в камері згоряння є важливим чинником, що визначає екологічні характеристики газотурбінної установки (ГТУ), які поряд з техніко-економічними показниками установки обумовлюють конкурентоспроможність комплексу в цілому.

Розглядом різних аспектів цієї проблеми займаються у багатьох університетах, проектних та конструкторських організаціях як у нас в країні: НТУУ «КПІ», ІТТФ НАНУ (м. Київ), Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, ІПМаш НАН України, ВАТ «Турбоатом» (м. Харків), ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», НУК ім. адмірала Макарова (м. Миколаїв), ДП Запорізьке МКБ «Прогрес», ВАТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), так і закордоном: General Electric Company, Applied Plasma Technologies (США), Mitsubishi Group (Японія), Siemens Westinghouse (Німеччина), British Gas (Великобританія), ВАТ «Сатурн» (Росія). Результати досліджень із зазначеної проблематики представлено в роботах вітчизняних і зарубіжних вчених: Халатова А. А., Топала О. І., Чернявського М. В., Романова В. І., Мессерле В. С., Устименко О. Б., Такао Hashimoto, Takeshi Suzuki та ін.

Аналіз результатів проведених досліджень показує, що при роботі традиційних камер згоряння газотурбінних двигунів на синтез-газі в ряді випадків спостерігається збільшення шкідливих викидів. Одним із варіантів, що дозволяє істотно знизити рівень емісії оксидів азоту, є спалювання за технологією RQL (Rich-Burn / Quick-Mix / Lean-Burn – «багате горіння / швидке змішування / бідне горіння»). Однак, незважаючи на значні переваги даного підходу, в даний час практично відсутнє обґрунтування ефективної організації робочого процесу в камерах згоряння ГТД, що працюють на синтез-газах різного складу, одержуваних плазмохімічною переробкою вугілля, з урахуванням особливостей схеми горіння RQL, детально не розроблені теоретичні моделі, що дозволяють прогнозувати характеристики подібних пристроїв, не розроблені практичні рекомендації з модернізації існуючих паливоспалюючих пристроїв для здійснення цієї низькоемісійної технології.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано автором-аспірантом кафедри «Турбін» машинобудівного

інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) в рамках пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні, напрямок 3 «Енергетика та енергоефективність» відповідно до тематичного плану фундаментальних науково-дослідних робіт НУК за держбюджетними темами № 01112U000349 «Системні дослідження та розробка моделей програмно-цільового розвитку систем теплопостачання України на основі новітніх технологій і процесів енергоперетворення» (2012-2014 рр.) і № 0111U002309 «Теоретичні основи процесів плазмохімічної переробки низькосортного вугілля і використання синтез-газу в газотурбінних установках» (2011-2013 рр.), а також міжнародного наукового проекту «New Plasma Assisted Combustion Technology for Power Systems», що виконувався за грантом US Civilian Research & Development Foundation: CRDF CGP Climate Change & Energy Національним університетом кораблебудування і компанією Applied Plasma Technologies, LLC (Вірджинія, США) в 2012-2013 рр. У цих роботах автор брала участь в якості виконавця на посаді молодшого наукового співробітника.

Об'єктом дослідження є термодинамічні та гідродинамічні процеси в камерах згоряння ГТД, що працюють на продуктах плазмохімічної переробки вугілля різного морфологічного складу.

Предмет дослідження – фізико-хімічні характеристики процесів вигорання синтез-газу та утворення токсичних компонентів в газотурбінних камерах згоряння, аеродинамічна структура тривимірних хімічно реагуючих потоків в паливоспалюючих пристроях і плазмохімічних газифікаторах.

Метою наукового дослідження є вдосконалення характеристик камер згоряння газотурбінних двигунів, що працюють на продуктах плазмохімічної переробки високосольного вугілля, використанням технології спалювання RQL.

Основні задачі наукового дослідження:

- обґрунтування можливостей використання двозонної технології спалювання палив RQL в камерах згоряння газотурбінних двигунів, що працюють на синтез-газі, отриманому плазмохімічною переробкою високосольного вугілля;
- розробка універсальної математичної моделі газотурбінної камери згоряння, що працює на синтез-газі різного складу;
- верифікація розробленої універсальної математичної моделі за результатами натурних експериментів;
- розробка узагальненої схеми комплексу з внутрішньоцикловою плазмохімічною газифікацією і виробленням електроенергії;
- визначення ефективності використання синтез-газу, отриманого плазмохімічною переробкою вугілля, в циклі газотурбінної установки;
- числові дослідження фізико-хімічних процесів в багатоступеневих плазмохімічних газифікаторах;
- числові дослідження впливу складу синтез-газу на температурні і емісійні характеристики камер згоряння ГТД;
- впровадження результатів досліджень у практику проектування камер згоряння ГТД, що працюють на синтез-газі різного складу.

Методика і методи дослідження. Удосконалення характеристик камер згоряння газотурбінних двигунів, що забезпечують роботу комплексу плазмохімічної переробки високозольного вугілля в синтез-газ з подальшим виробленням електроенергії, забезпечено теоретико-експериментальним розв'язанням дослідницьких завдань на єдиній методологічній основі. При постановці дослідів використовувалася загальна теорія моделювання та планування експериментів, а при обробці даних та перевірці гіпотез – статистичний аналіз.

Наукові результати, які автор захищає, та їх новизна:

Вперше:

- показано, що поліпшення показників газотурбінних двигунів і підвищення стабільності процесів горіння низькокалорійних синтез-газів різного складу, отриманих внутрішньоцикловою плазмохімічною переробкою вугілля, досягається за рахунок використання запропонованої двозонної технології спалювання вуглеводневих палив RQL (Rich-Burn, Quick-Mix, Lean-Burn);

- показано, що застосування комплексу з внутрішньоцикловою плазмохімічною переробкою вугілля та виробленням електроенергії ГТА, що працює на синтез-газі, і утилізацією теплоти на основних його стадіях забезпечує можливість використання в якості вихідної сировини високозольного вугілля різного морфологічного складу за високої повноти його переробки та екологічності процесів;

- встановлено, що для зниження емісії оксидів азоту до 70 % для ГТД з камерою згоряння, яка працює за технологією RQL, в порівнянні з традиційною дифузійною схемою необхідне створення умов для ефективного перемішування реагентів в первинній зоні камери та недопущення формування в ній суміші стехіометричного складу, що досягається вибором раціональних співвідношень геометричних розмірів паливоспалюючих пристроїв, зокрема відношення діаметра вихідного перерізу зони багатопаливоповітряної суміші до діаметру жарової труби повинно знаходитися в діапазоні 0,40-0,55;

- в результаті числових досліджень багатоступеневих плазмохімічних газифікаторів виявлено, що для енергетичного комплексу з внутрішньоцикловою переробкою високозольного вугілля в синтез-газ і виробленням електроенергії ГТА максимальна ефективність досягається використанням плазмової киснево-парової газифікації при значеннях сумарного коефіцієнта надлишку окиснювача 0,30-0,35, що забезпечує максимальний вміст молекулярного водню і оксиду вуглецю в синтез-газі;

- встановлено, що при роботі камери згоряння ГТД на синтез-газі мінімальне значення нижчої теплотворної здатності палива, що забезпечує ефективне його згоряння без додаткової подачі природного газу, становить близько 20 МДж/кг.

Отримали подальший розвиток:

- підхід до визначення і прогнозування характеристик камер згоряння ГТД і плазмохімічних газифікаторів, заснований на числовому моделюванні робочих процесів шляхом використання вдосконаленої моделі реагування Eddy-Dissipation-Concept (EDC), яка відрізняється від відомих тим, що враховує особливості окиснення синтез-газів за допомогою детальних хімічних механізмів в

умовах взаємодії зони реагування з турбулентними збуреннями потоку, а також специфіку процесів газифікації твердих органічних палив;

- метод розрахунку робочих параметрів багатоступневих плазмохімічних газифікаторів, що працюють на повітрі, кисні і суміші кисню і водяної пари, заснований на припущенні про термодинамічну рівновагу хімічно реагуючої системи.

Достовірність результатів досліджень забезпечується застосуванням сучасних розрахунково-експериментальних методів і засобів, коректністю застосовуваних методик досліджень, прийнятною точністю отримання експериментальних даних, задовільним узгодженням результатів теоретичних і експериментальних досліджень, математико-статистичною обробкою отриманих даних, результатами натурних випробувань. Отримані в роботі результати є логічними і не суперечать практиці проектування камер згоряння газотурбінних двигунів.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено і верифіковано математичну модель газотурбінної камери згоряння, що працює на продуктах плазмохімічної переробки вугілля;
- розроблено схему комплексу з внутрішньоцикловою плазмохімічною переробкою високозольного вугілля та використанням отриманого синтез-газу в циклі ГТУ, що дозволяє проводити дослідження і обирати раціональні параметри подібних енергетичних систем з урахуванням властивостей вугілля різних родовищ;
- створено методику обчислювального експерименту для вдосконалення робочого процесу камер згоряння ГТД, що працюють на синтез-газі різного складу, на базі комплексу обчислювальної гідродинаміки;
- розроблено рекомендації щодо поліпшення екологічних характеристик камери згоряння двигуна UGT2500 потужністю 2,5 МВт, який працює на синтез-газі різного складу, за рахунок використання технології спалювання RQL, що дозволяє підвищити стабільність роботи камери на низькокалорійних паливних газах;
- запропоновано нові конструктивні рішення камери згоряння двигуна UGT2500, які захищені патентом України на корисну модель, що забезпечують ефективну її роботу на синтез-газі, отриманому плазмохімічною переробкою низькосортного вугілля.

Результати роботи і методики розрахунку аеродинаміки потоків в камерах згоряння ГТД використовуються в НВКГ «Зоря»-«Машпроект» при доводці і модернізації існуючих і проектуванні перспективних зразків камер згоряння ГТД, що працюють на синтез-газі різного фракційного складу. Розроблена багатоступенева модель хімічної кінетики для прогнозування параметрів камер згоряння ГТД впроваджена в навчальний процес НУК і використовується при виконанні дипломних проектів та магістерських робіт за спеціальностями 8.05060402 «Турбіни» і 8.05060406 «Газотурбінні установки і компресорні станції».

Апробація результатів роботи. Основні наукові та практичні результати дисертаційних досліджень доповідалися і були позитивно оцінені на IV Міжнародній науково-технічній конференції «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення» (Миколаїв, 2011 р.), на V і VI Міжнародних науково-технічних конференціях з проблем екології та енергозбереження в суднобудуванні (Миколаїв,

2010-2011 рр.), на XVII-XIX Міжнародних конгресах двигунобудівників (Харків-Рибаче, 2012-2013 рр., Харків-Коблево, 2014 р.), на III-V Міжнародних науково-технічних конференціях «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2012-2014 рр.), на 7-9 International Conference on Plasma Assisted Technologies (ICPAT) (Лас-Вегас, США, 2011 р., Ріо-де-Жанейро, Бразилія, 2013 р., Санкт-Петербург, Росія, 2014 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 23 наукові роботи, із них 2 статті в міжнародних рецензованих виданнях, які входять до бази даних Scopus, 6 статей в спеціалізованих наукових виданнях по технічним наукам, які входять в перелік, затверджених ВАК України, 1 патент на корисну модель, 14 матеріалів в збірниках міжнародних конференцій, із них 4 – зарубіжних.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із переліку умовних скорочень, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг дисертаційної роботи становить 172 стор., рисунків – 79, таблиць – 26. Список використаних джерел містить 126 найменувань на 14 сторінках. У додатках наведено акти впровадження результатів досліджень.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** на основі огляду вітчизняних і закордонних літературних джерел виконано аналіз методів газифікації органічних матеріалів з отриманням синтез-газу як палива, розглянуто основні технологічні схеми парогазових установок (ПГУ) на твердому паливі, а також основні особливості організації робочого процесу в камерах згоряння ГТД, призначених для роботи на синтез-газах. Враховуючи переваги і недоліки існуючих напрямків розвитку ПГУ на твердому паливі, найбільший інтерес представляють установки, що працюють за принципом внутрішньоциклової газифікації вугілля із застосуванням плазмових технологій. Аналіз конструктивних схем сучасних низькоемісійних камер згоряння ГТД виявив перспективу використання технології RQL (Rich-Burn / Quick-Mix / Lean-Burn), що дозволяє організувати стійке та екологічно чисте спалювання синтез-газів різних складів на основних режимах роботи двигуна.

У **другому розділі** обґрунтовано напрям дослідження, пов'язаний із удосконаленням характеристик камер згоряння газотурбінних двигунів, що працюють на продуктах плазмохімічної переробки високозольного вугілля, використанням технології спалювання RQL. Сформульовані мета і завдання наукового дослідження.

Створено і верифіковано універсальну математичну модель хімічно реагуючих потоків в камерах згоряння ГТД, що працюють на синтез-газах різного складу, а також в системах плазмохімічної газифікації вугілля, яка дозволяє коректно прогнозувати гідродинамічні і хімічні процеси в паливоспалюючих пристроях.

Запропонована математична модель заснована на рівняннях нерозривності (1), збереження кількості руху (2), збереження енергії (3), переносу хімічних компонентів суміші (4), рівняннях моделі турбулентності (5-6).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau_{st}) + \rho \vec{g} + \vec{F}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_h; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k; \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon, \quad (6)$$

де ρ – масова густина потоку; \vec{v} – вектор локальної швидкості потоку; S_m – джерельний член, який визначає масу, привнесену в потік будь-яким способом; p – статичний тиск; $\rho \vec{g}$ – гравітаційна сила; \vec{F} – зовнішні сили; $\vec{\tau}$ – тензор тисків; E – внутрішня енергія; Y_i – масова концентрація хімічного компонента i ; \vec{J}_q – густина теплового потоку суміші; \vec{J}_j – густина дифузійного теплового потоку j -го компонента суміші; S_h – джерельний член, що описує тепловиділення в результаті хімічних реакцій, S_i – рівень додаткового утворення i -го компонента із дисперсної фази чи інших джерел; \vec{J}_i – масова дифузія i -го компонента; R_i – рівень утворення i -го компонента в результаті хімічної реакції; i, j, k – одиничні вектори у напрямі x, y, z ; t – час; ρ – масова густина суміші; k і ε – кінетична енергія турбулентності і питома швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності; μ_{eff} – коефіцієнт ефективної в'язкості; G_k – генерація турбулентної кінетичної енергії в залежності від градієнтів усереднених швидкостей; G_b – генерація турбулентної кінетичної енергії в результаті дії сил плавучості; Y_M – внесок пульсаційного розширення для стисливих потоків; величини α_k і α_ε – зворотні значенням ефективного числа Прандтля для k і ε відповідно; S_k і S_ε – джерельні члени; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ – емпіричні константи моделі турбулентності.

Для розрахунків пристроїв плазмохімічної газифікації вугілля рівняння (1-6) доповнюються низкою співвідношень, які враховують специфіку процесів газифікації твердих органічних палив: моделлю дискретної фази DPM (7), моделлю виділення летких фракцій (8) і моделлю швидкості реакцій поверхневого типу:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x; \quad (7)$$

$$-\frac{dm_p}{dt} = k[m_p - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}], \quad (8)$$

де $F_D(u - u_p)$ – сила опору на одиницю маси частинок, F_x – додатковий член (сила на одиницю маси частинок); u – швидкість рідкої фази; u_p – швидкість частинки; ρ – густина рідини; ρ_p – густина частинки; m_p – маса частинки; $f_{v,0}$ – початкова масова частка летких фракцій частинки; $f_{w,0}$ – масова частка випаровування / кипіння матеріалу (моделюється у разі вологого спалювання); $m_{p,0}$ – початкова маса частинки; k – кінетичний коефіцієнт.

Для детального аналізу робочих процесів в камері згорання, що працює на синтез-газі, було застосовано два механізми хімічної кінетики: 35-реакційний механізм, отриманий автором шляхом спрощення багатореакційної кінетичної схеми GRI-Mech, і кінетичний механізм, запропонований Yetter R. A (Pennsylvania State University), Dryer F. L. і Rabitz H. (Princeton University).

Для розрахунків процесів газифікації вугілля автором запропоновано хімічний механізм, що складається з 45 реакцій, 5 із яких є гетерогенними реакціями, які протікають на поверхні вугільних частинок. Для проведення розрахунків процесів окиснення синтез-газу в газотурбінних камерах згорання та плазмохімічної газифікації вугілля різного морфологічного складу автором запропоновано і застосовано модель горіння EDC (Eddy-Dissipation-Concept), що враховує взаємодію кінетики і турбулентності потоків.

У моделі горіння EDC швидкості реакцій визначаються за рівняннями Арреніуса і інтегруються за допомогою ISAT алгоритму. Тоді молярна швидкість утворення / розкладання i -го компонента в реакції визначається:

$$R_i = \frac{\rho(\xi^*)^2}{\tau^* [1 - (\xi^*)^3]} (Y_i^* - Y_i),$$

де Y_i^* – масова частка i -го реагенту після закінчення часу τ^* .

Час протікання реакції:

$$\tau^* = C_\tau \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2},$$

де $C_\tau = 0,4082$ – емпірична константа.

Верифікація розробленої універсальної математичної моделі із застосуванням різних кінетичних схем здійснювалася шляхом порівняння розрахункових даних з експериментальними, отриманими при дослідженні на спеціалізованому стенді камери допалювання синтез-газу ежекторного типу, розробленої за участю автора в рамках міжнародного наукового проекту «New Plasma Assisted Combustion Technology for Power Systems» (рис. 1).



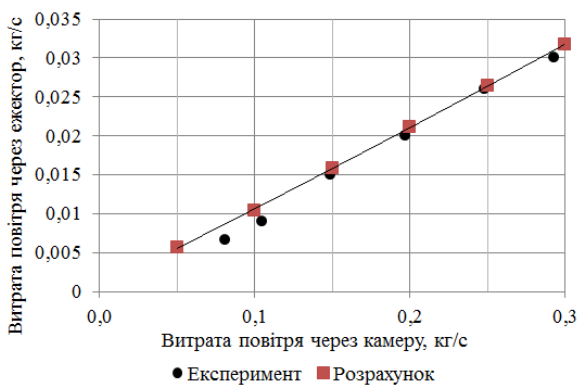
а



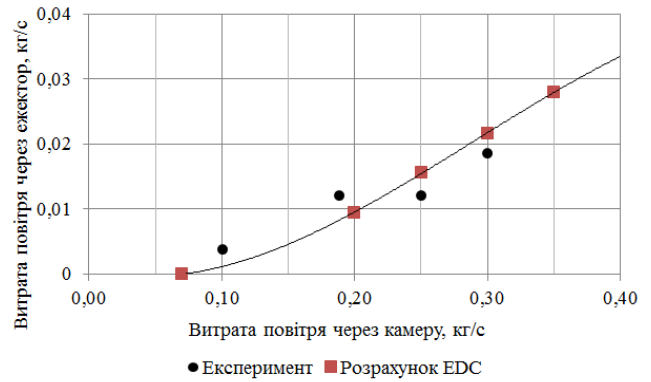
б

Рис. 1. Експериментальний стенд для дослідження процесів горіння синтез-газу:
а – загальний вигляд стенду; б – камера допалювання синтез-газу в зборі

Дослідження робочих процесів в камері допалювання проводилися при атмосферному тиску, при цьому масова витрата повітря варіювалася від 50 до 400 г/с. Порівняння розрахункових і експериментальних значень основних параметрів камери на режимах холодної та гарячої продувок представлені на рис. 2-3.



а



б

Рис. 2. Експериментальні та розрахункові залежності витрати повітря через ежектор від витрати повітря через камеру: а – холодна продувка; б – гаряча продувка

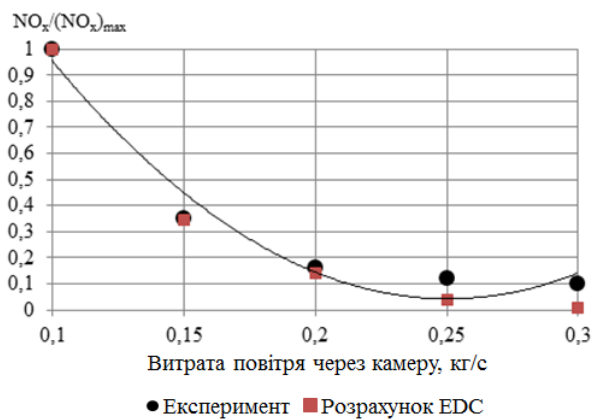


Рис. 3. Експериментальні та розрахункові залежності викидів оксидів азоту від витрати повітря через камеру допалювання

Аналіз отриманих результатів показує прийнятний рівень узгодження експериментальних і розрахункових значень, що підтверджує адекватність обраних математичних та фізичних моделей і можливість їх використання для розрахунків камер згоряння ГТД, що працюють на синтез-газі.

Верифікацію математичної моделі зі спрощеним 35-реакційним кінетичним механізмом, що описує процеси в плазмовому газифікаторі вугілля, виконано шляхом порівняння розрахункових даних, отриманих автором у розрахунках, з даними експерименту, виконаними вченими В. Є. Мессерле і О. Б. Устименко (Інститут проблем горіння, Науково-дослідний інститут нових хімічних технологій і матеріалів, Казахстан, м. Алмати).

Третій розділ присвячено питанням ефективності використання синтез-газу, отриманого плазмохімічною переробкою вугілля, в циклі ГТУ. Автором розроблено узагальнену схему комплексу з внутрішньоцикловою переробкою високозольного вугілля в синтез-газ з подальшим виробленням електроенергії (рис. 4), що дозволяє досліджувати можливості отримання синтез-газу трьома методами газифікації вугілля в прямоточному газифікаторі з плазмовою ініціацією процесу: методом повітряного дуття, з подачею кисню, а також одночасним дуттям водяної пари і кисню.

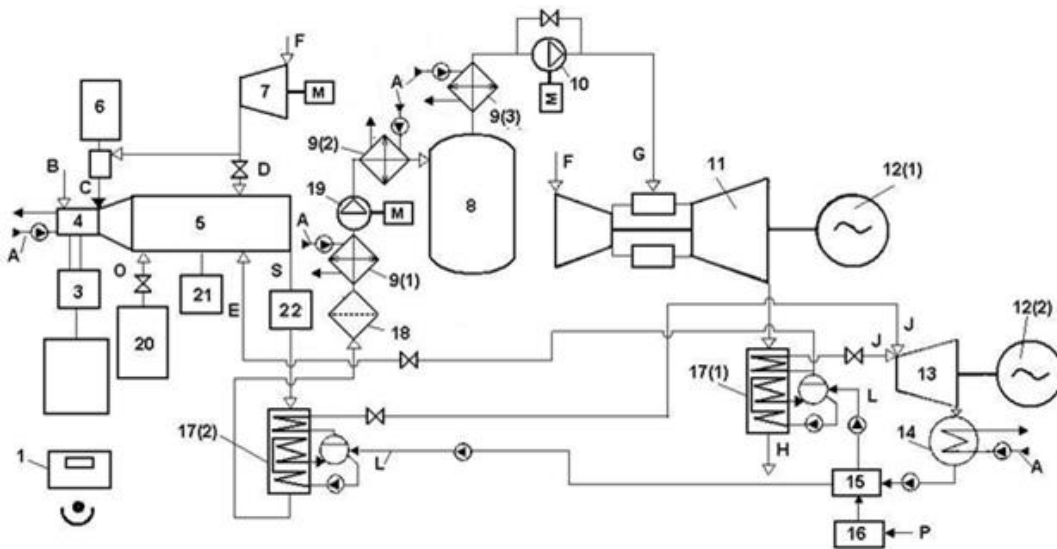


Рис. 4. Узагальнена схема комплексу з внутрішньоцикловою переробкою високозольного вугілля в синтез-газ і виробленням електроенергії:

1 – система автоматики; 2 – високовольтний модуль джерела живлення плазмотрона; 3 – високочастотний модуль; 4 – високочастотний плазмотрон; 5 – багатоступінчастий газифікатор вугілля; 6 – вугільний млин; 7 – компресор повітря; 8 – ємність зберігання синтез-газу; 9 (1), 9 (2), 9 (3) – охолоджувачі синтез-газу; 10 – компресор паливного синтез-газу; 11 – ГТД; 12 (1), 12 (2) – електрогенератори; 13 – парова турбіна; 14 – паровий конденсатор; 15 – теплий ящик; 16 – система водопідготовки; 17 (1), 17 (2) – утилізаційні парогенератори (УПГ); 18 – модуль низькотемпературного очищення синтез-газу; 19 – компресор стиснення синтез-газу; 20 – модуль вироблення кисню; 21 – піддон для збору золи; 22 – модуль високотемпературного очищення синтез-газу

Для виконання досліджень і вибору раціональних параметрів запропонованої схеми плазмохімічної переробки високозольного кам'яного вугілля в синтез-газ розроблено її узагальнену модель, а також сформовано комплекс розрахункових комп'ютерних програм. Розроблений підхід дозволяє досліджувати і проектувати комплекс під будь-який заданий ГТД необхідної потужності з використанням в якості сировини вугілля різних родовищ, властивості яких відомі.

При виконанні досліджень оцінено вироблення електроенергії для зовнішнього споживача, а також ККД перетворення теплової енергії вихідного вугілля в товарну електроенергію, визначено витрати енергії (рис. 5) у схемі газифікації вугілля для ГТД типу UGT3200 номінальною потужністю 3400 кВт.

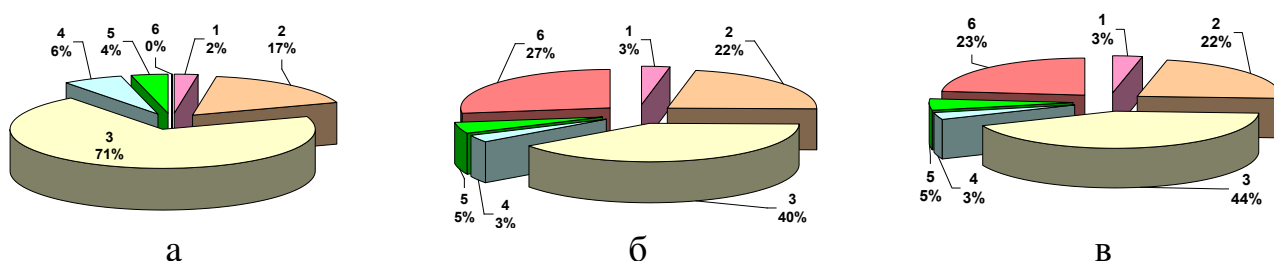


Рис. 5. Структура витрат енергії в схемі газифікації вугілля для ГТД UGT3200:

а) повітряне дуття; б) дуття киснем; в) киснево-парове дуття;

1 – потужність на власні потреби теплоутилізаційних контурів ТУК1 + ТУК2; 2 – потужність, що підводиться до плазмотронів; 3 – потужність приводу компресора синтез-газу; 4 – потужність приводу компресора подачі повітря; 5 – витрати енергії на розмелювання вугілля; 6 – витрати енергії на виробництво і подачу кисню

Значення корисного виходу електроенергії еквівалентне потужності вихідного ГТД і становить від 2900 до 3580 кВт для різних способів газифікації, причому утилізаційна парова турбіна виробляє від 20 до 30 % всієї потужності.

Четвертий розділ присвячено теоретичним дослідженням процесів в багатоступеневих плазмохімічних газифікаторах. Виконано ряд числових експериментів з моделювання процесів повітряної, кисневої та киснево-парової газифікації низькосортного вугілля з метою визначення раціональних параметрів роботи газифікаторів. Визначено хімічний склад синтез-газу на виході газифікаторів для різних умов роботи і значення його теплотворної здатності.

За результатами проведених розрахунків визначено раціональні значення сумарних коефіцієнтів надлишку окиснювача: для плазмової повітряної газифікації 0,35-0,45, для плазмової кисневої та киснево-парової газифікації 0,3-0,35, які забезпечують максимальний вміст молекулярного водню і оксиду вуглецю в синтез-газі.

Досліджено вплив аеродинамічних схем подачі закрученого повітря з «прямим» і «зворотним» вихором на ефективність плазмохімічного отримання синтез-газу. Встановлено, що аеродинамічна схема підведення повітря через завихрювач має незначний вплив на процес газифікації вугілля.

В **розділі 5** виконано дослідження температурних і емісійних характеристик камери згоряння ГТД потужністю 2,5 МВт, що працює на синтез-газі.

Розрахунки проводилися для трьох варіантів складу паливного газу. Варіант 1 передбачав подачу в камеру згоряння метану, результати його розрахунків порівнювалися з результатами експериментальних досліджень традиційної камери згоряння дифузійного типу і використовувалися для верифікації кінетичної схеми окиснення вуглеводнів. Варіанти 2 і 3 припускають подачу в камеру згоряння синтез-газу різного компонентного складу з теплотворною здатністю 21791 і 12448 кДж/кг відповідно. Для забезпечення однакової теплової потужності пального пристрою, що відповідає номінальному режиму ГТД, витрати синтез-газу були збільшені в порівнянні з витратою метану пропорційно зменшенню теплотворної здатності. Було також збільшено площі прохідних перерізів пального пристрою для забезпечення необхідної швидкості витікання синтез-газу з отворів без зриву факела.

Проведені дослідження впливу складу синтез-газу на робочий процес камери згоряння дифузійного типу газотурбінного двигуна потужністю 2,5 МВт показали зниження стабілізуючого ефекту зони зворотних токів при роботі камери на синтез-газі з найменшою (12,45 МДж/кг) теплотворною здатністю.

Встановлено, що заміна природного газу (метану) на синтез-газ для серійної камери згоряння ГТД, здійснювана без істотних конструкторських змін жарової труби, призводить до збільшення викидів токсичних компонентів. Із зменшенням теплотворної здатності синтез-газу і збільшенням швидкості течії робочого тіла в камері згоряння зона утворення NO_x зсувається до вихідного перерізу. За рахунок цього розрахункові викиди NO_x для варіанту 3 з мінімальною теплотворною здатністю синтез-газу максимальні і становлять близько 200 ppm. Викиди оксидів азоту камери, що працює на синтез-газі, до складу якого входить метан (варіант 2), склали 94 ppm. Розрахункові викиди оксидів азоту в камері, що працює на чистому метані (варіант 1), мінімальні і становлять 66 ppm.

Таким чином, проведене числове дослідження характеристик серійної камери згоряння ГТД потужністю 2,5 МВт при переведенні її на синтез-газ показало необхідність внесення істотних змін у схему організації робочого процесу камери згоряння з метою підвищення стабільності та ефективності її роботи, особливо при роботі на низькокалорійному синтез-газі.

Шостий розділ присвячено удосконаленню характеристик камер згоряння ГТД, призначених для роботи на синтез-газі. З метою підвищення стабільності процесів горіння низькокалорійних синтез-газів і поліпшення екологічних показників камери згоряння газотурбінного двигуна UGT2500 запропоновано замість традиційної технології дифузійного спалювання паливного газу використовувати двозонну технологію RQL, що визначає необхідність модифікації серійної камери згоряння. Проведено числові розрахунки ряду модифікацій камери згоряння ГТД UGT2500, спрямованих на вибір раціональних геометричних і режимних параметрів двозонної камери.

Спочатку в конструкцію серійної камери згоряння було внесено наступні зміни:

1. Зменшено кількість повітря, що подається в первинну зону горіння за рахунок переходу від загороджувальної системи охолодження до конвективної та

організації RQL-схеми згоряння синтез-газу. З цією метою було прибрано два пояси отворів охолодження, а отвори подачі первинного повітря перенесені на третю обичайку. Додатково змінено форму зовнішнього корпусу з метою збільшення швидкості протікання повітря у міжтрубному просторі жарової труби для більш ефективного конвективного її охолодження (модифікована схема 1).

2. Завихрювач повітря винесено за межі жарової труби і змінено форму первинної зони камери на конічну (модифікована схема 2).

3. Для конструктивної схеми 3 додано спеціальні втулки (гільзи) на отвори первинного повітря з метою збільшення глибини проникнення струменів повітря і поліпшення якості змішування компонентів на виході.

Встановлено, що для всіх розглянутих схем в зоні горіння багатопаливоповітряної суміші (Rich-Burn) спільно з ділянкою швидкого перемішування (Quick-Mix) не забезпечуються умови зменшення концентрації термічних оксидів азоту. Навпаки, складаються сприятливі умови для їх значного утворення. А саме, має місце досить висока температура горіння, відповідна значенню коефіцієнта надлишку повітря, близького до стехіометричного.

Незважаючи на те, що розрахункові інтегральні коефіцієнти надлишку повітря у первинній зоні камери для модифікованих схем складають близько 0,6 (тобто збагачені паливом суміші), у ряді локальних ділянок камери ці значення близькі до 1 через підсос охолоджуючого і додаткового повітря в первинну зону горіння. Цей ефект не дозволив домогтися емісії оксидів азоту менше 130 ppm, що говорить про необхідність подальшої модифікації камери.

Для зменшення імовірності утворення локальних ділянок в камері зі стехіометричним значенням коефіцієнта надлишку повітря, зменшення підсосів повітря в первинну зону (Rich-Burn) запропоновано перетиснути переріз жарової труби перед отворами підведення первинного повітря. Для модифікованих схем 4 і 5 діаметр відповідної обичайки жарової труби було зменшено на 10 % (рис. 6, б) і на 55 % (рис. 6, в) у порівнянні зі схемою 3 (рис. 6, а).

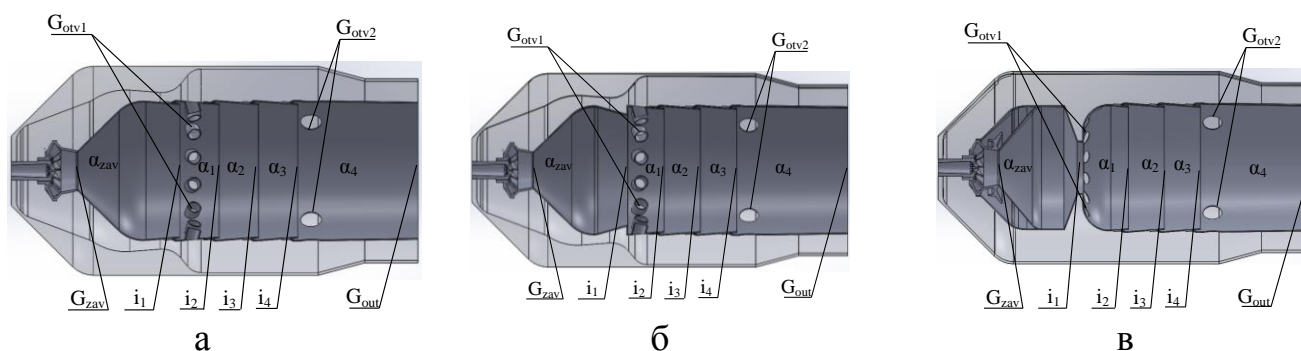


Рис. 6. Конструктивні схеми камер згоряння:

а – модифікована схема 3; б – модифікована схема 4; в – модифікована схема 5

Для схеми 5 прийнято рішення не змінювати форму кожуха камери згоряння з метою мінімізації конструктивних змін базової конструкції. Більш сильне звуження перерізу жарової труби в цій схемі дозволило уникнути необхідності установки спеціальних гільз для збільшення далекобійності струменів первинного повітря.

Позитивним ефектом відсутності підсосу первинного повітря в зону горіння багатой паливоповітряної суміші стало різке зменшення розрахункових концентрацій оксидів азоту у вихідному перерізі до 29 ppm для модифікованої схеми 5 (табл. 1), що відповідає сучасним міжнародним екологічним вимогам.

Проведені розрахунки показали (рис. 7), що для ефективної організації робочого процесу в камері згорання, яка працює на синтез-газі, інтервал відношення діаметра звуженої частини обичайки зони багатого горіння паливоповітряної суміші (d_1) до діаметру циліндричної частини (d_0) жарової труби становить 0,4-0,55.

Таблиця 1

Результати моделювання камери згорання, що працює на синтез-газі

	Схема 3	Схема 4	Схема 5
Температура газів на виході з камери, К	1194,2	1192,3	1190,9
Концентрація NO, ppm	144,3	109,1	28,9

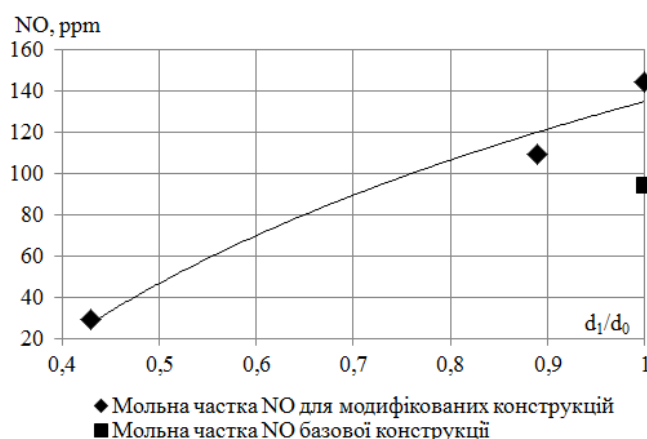


Рис. 7. Емісія оксидів азоту NO в камері згорання, що працює на синтез-газі

Додатково виконано дослідження для визначення інтервалу значень теплотворної здатності синтез-газу, який дозволяє реалізувати стійке і ефективне його вигорання без додаткової подачі природного газу. Проведені варіантні розрахунки передбачали подачу в камеру згорання модифікованої схеми 5 синтез-газу різного компонентного складу, отриманого плазмохімічною переробкою низькосортного вугілля: варіант 1 – нижча теплотворна здатність синтез-газу 33089 кДж/кг, варіант 2 – 21791 кДж/кг, варіант 3 – 12448 кДж/кг.

Дані CFD-розрахунків показують, що при роботі камери згорання ГТД потужністю 2,5 МВт на синтетичному паливі мінімальне значення нижчої теплотворної здатності синтез-газу, яке забезпечує ефективне його згорання без додаткової подачі природного газу, становить близько 20 МДж/кг.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено нове розв'язання задачі вдосконалення характеристик камер згорання газотурбінних двигунів, що працюють на синтез-газі різного складу, отриманого в комплексі плазмохімічної переробки високозольного

вугілля, шляхом вибору їх раціональних геометричних і режимних параметрів. На підставі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу та узагальнення вітчизняних і закордонних літературних даних сформульовано основні напрями вдосконалення робочих процесів в камерах згоряння ГТД, що працюють на синтез-газі різного складу, отриманого плазмохімічною переробкою вугілля, за рахунок використання технології RQL, яка дозволяє організувати стійке та екологічно чисте спалювання на різних режимах роботи двигуна.

2. Створено універсальну математичну модель хімічно реагуючих потоків в камерах згоряння ГТД, що працюють на синтез-газі різного складу, а також в системах плазмохімічної газифікації вугілля, яка дозволяє коректно прогнозувати аеродинамічні і хімічні процеси в паливоспалюючих пристроях. Запропоновано та верифіковано детальні кінетичні механізми окиснення синтез-газу, що дозволяють прогнозувати розподіл температур і концентрацій хімічних компонентів в окремих елементах комплексу плазмохімічної переробки високозольного вугілля. Отримано задовільну відповідність результатів числових і натурних експериментів.

3. Розроблено узагальнену схему комплексу з внутрішньоцикловою плазмохімічною переробкою високозольного вугілля, а також сформовано комплекс розрахункових програм, що дозволяє досліджувати і проектувати комплекс під будь-який заданий ГТД необхідної потужності з використанням в якості сировини вугілля різних родовищ, властивості якого відомі.

4. У результаті виконаних розрахунків теплової схеми комплексу на базі вітчизняного ГТД потужністю 2,5 МВт, що працює на синтез-газі, отримані дані по її ефективності. Значення корисного виходу електроенергії еквівалентне потужності вихідного ГТД і становить від 2900 до 3580 кВт для різних способів газифікації, причому утилізаційна парова турбіна виробляє від 20 до 30 % всієї потужності, а ККД перетворення теплової енергії вихідного вугілля в товарну електроенергію – від 26 до 29 %. Максимальний розрахунковий ККД досягається при використанні процесу киснево-парової газифікації.

5. Визначено раціональні значення сумарних коефіцієнтів надлишку окиснювача в процесах плазмохімічної газифікації вугілля різного складу: для повітряної газифікації 0,35-0,45, для кисневої та киснево-парової газифікації 0,3-0,35, які забезпечують максимальний вміст молекулярного водню і оксиду вуглецю в синтез-газі для використання в камері згоряння ГТД. При здійсненні кисневої газифікації вугілля теплотворна здатність отриманого синтез-газу в 3-4 рази вище, ніж при повітряній, і приблизно на 7-10 % більше, ніж при киснево-паровій. В той же час витрата синтез-газу при кисневій газифікації є найменшою. Досліджено вплив аеродинамічних схем подачі закрученого повітря з «прямим» і «зворотним» вихором на ефективність плазмохімічного отримання синтез-газу. Схема підведення повітря через завихрювачі має незначний вплив на процес переробки вугілля. Значно більше на ефективність процесів газифікації впливають схема подачі вугільних частинок і їх час перебування в об'ємі газифікатора.

6. На основі результатів математичного моделювання визначено, що заміна природного газу (метану) на синтез-газ для серійної камери згоряння ГТД

потужністю 2,5 МВт, здійснювана без істотних конструкторських змін жарової труби, призводить до збільшення викидів токсичних компонентів, зокрема оксидів азоту NO від 66 до 200 ppm залежно від складу паливного газу.

7. Проведені теоретичні дослідження щодо поліпшення екологічних показників камери згоряння показують, що перехід до RQL-схеми горіння синтетичного палива за рахунок простого перерозподілу кількості повітря за перерізами жарової труби забезпечує більш високу повноту згоряння синтез-газу, але не зменшує викидів оксидів азоту. Встановлено, що виконання звуження вихідного перерізу обичайки жарової труби в зоні горіння багатопаливоповітряної суміші дозволяє мінімізувати викиди оксидів азоту.

8. На основі виконаних варіантних розрахунків камери згоряння ГТД UGT2500 потужністю 2,5 МВт, що працює на синтез-газі, розроблено практичні рекомендації щодо вибору раціональних геометричних та режимних параметрів камери, які дозволяють знизити розрахункові викиди оксидів азоту у вихідному перерізі до 29 ppm при збереженні рівня викидів оксидів вуглецю та незначному збільшенні втрат повного тиску в камері, що відповідає сучасним міжнародним екологічним вимогам. Раціональне відношення діаметра звуженої частини обичайки зони багатого горіння паливоповітряної суміші до діаметру циліндричної частини жарової труби становить 0,40-0,55. При цьому має місце зниження емісії оксидів азоту NO у вихідному перерізі жарової труби на 69-36 % відповідно. Встановлено, що при роботі камери згоряння ГТД потужністю 2,5 МВт на синтетичному паливі мінімальне значення нижчої теплотворної здатності синтез-газу, яке забезпечує ефективне його згоряння без додаткової подачі природного газу, становить близько 20 МДж/кг.

9. Розроблені практичні рекомендації по вдосконаленню камер згоряння ГТД, що працюють на синтез-газі, дозволять створювати нові зразки конкурентоспроможної на світовому ринку продукції, яка задовольняє міжнародним нормам на викиди токсичних компонентів.

10. Основні результати дисертаційної роботи мають теоретичне і практичне значення і використовуються в НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв) при доводці і модернізації існуючих і проектуванні перспективних зразків камер згоряння ГТД, що працюють на синтез-газі різного фракційного складу, а також впроваджені в навчальний процес НУК і використовуються при виконанні дипломних проектів та магістерських робіт за спеціальностями 8.05060402 «Турбіни» і 8.05060406 «Газотурбінні установки і компресорні станції».

Основні результати дисертації опубліковано в наукових **спеціалізованих виданнях**:

1. Сербин С. И. Характеристики камеры сгорания ГТД мощностью 2,5 МВт, работающей на синтез-газе / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 7 (94). – С. 119-123.

2. Сербин С. И. Теоретическое исследование процессов плазменной газификации угля / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // Вісник Національного університету кораблебудування. - № 2, 2012. – С.109-115.

3. Сербин С. И. Сравнительный анализ способов газификации углей различного морфологического состава / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // Вісник Національного технічного

університету “ХПІ”. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування : збірник наукових праць. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2013. – № 13 (987). – С. 89-93.

4. Сербин С. И. Численное моделирование процессов плазменной кислородной и кислородно-паровой газификации углей / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 8 (105). – С. 147-150.

5. Integrated Plasma Coal Gasification Power Plant / I. B. Matveev, N. V. Washcilenko, S. I. Serbin, N. A. Goncharova // *IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue on Plasma-Assisted Technologies*, 2013. – Vol. 41, Issue 12. – Pp. 3195-3200.

6. Сербин С. И. Исследование рабочих процессов камеры сгорания ГТД с применением RQL-технологии сжигания синтетического газа / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування : збірник наукових праць*. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2014. – № 12 (1055). – С. 29-33.

7. Сербин С. И. Особенности рабочего процесса камеры сгорания ГТД, работающей на синтез-газе различного состава / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // *Вестник двигателестроения*. – Запорожье, 2014. – № 2. – С. 102-106.

8. Serbin S. I. Plasma-assisted reforming of natural gas for GTL – Part I / S. I. Serbin, I. B. Matveev, N. A. Goncharova // *IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue on Plasma-Assisted Technologies*, 2014. – Vol. 42, Issue 12. – Pp. 3896-3900.

9. Декл. пат. на кор. мод. України 93619. Камера згоряння; F23C 3/00 / С. І. Сербін, Н. О. Гончарова, О. К. Чередніченко. – № u 2014 04451 ; Заявл. 25.04.2014 ; Опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19. – 4 с. : іл.

Основні публікації, в яких додатково викладено зміст дисертації:

10. Сербин С. И. Исследования камеры сгорания ГТД мощностью 2,5 МВт, работающей на синтез-газе / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // *Сучасний стан та проблеми двигунобудування : матеріали міжнародної конференції*. – 2012. – Режим доступа : <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail;jsessionid=93dfc3bd49ed0758a95036375295?lectureId=19352&conferenceId=12053&isProjectorView=false>.

11. Сербин С. И. Моделирование процессов в камере сгорания ГТД мощностью 2,5 МВт, работающего на синтез-газе / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // *Сучасний стан та проблеми двигунобудування : матеріали міжнародної конференції*. – Миколаїв, – 2010. – С. 61.

12. Сербин С. И. Возможности моделирования плазмохимической газификации угля. [Электронный ресурс] / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали V Міжн. наук-техн. конф.* – 2010. – Режим доступа : <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail;jsessionid=fecce4334bc518081ce730620ac06?lectureId=1350&conferenceId=7&isProjectorView=false>.

13. Сербин С. И. Численное моделирование процессов плазменной кислородной и кислородно-паровой газификации углей / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжн. наук.-техн. конф.* – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 204-206.

14. Сербін С. І. Плазмохімічні технології в енергетиці / С. І. Сербін, Н. О. Гончарова // *Муніципальна енергетика : проблеми, рішення : матеріали IV Міжн. наук-техн. конф.* – Миколаїв, 2011. – С. 174-175.

15. Сербин С. И. Характеристики камеры сгорания ГТД мощностью 2,5 МВт, работающей на синтез-газе [Электронный ресурс] / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*. – Миколаїв, 2012. – Режим доступа : <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail?conferenceId=12050&lectureId=17591>.

16. Сербин С. И. Исследование характеристик камеры сгорания ГТД мощностью 2,5 МВт, работающего на синтез-газе / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали VI Міжн. наук-техн. конф.* – Миколаїв, 2011. – С. 122-124.

17. Сербин С. И. Трехмерные исследования температурных и эмиссионных характеристик камер сгорания стационарных газотурбинных установок, работающих на синтез-

газе / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали 6 Міжн. наук.-техн. конф. – Миколаїв:НУК, 2013. – С. 265-266.

18. Сербин С. И. Совершенствование характеристик камер сгорания ГТД, предназначенных для работы на синтез-газе [Электронный ресурс] / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // Сучасний стан та проблеми двигунобудування. – Миколаїв, 2014. – Режим доступа : <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail;jsessionid=be3159bd5a09029990c7f4cf1729?lectureId=31536&conferenceId=26169&isProjectorView=false>.

19. Serbin S. Features of the working process in three-stage plasma coal gasification system / S. Serbin, N. Goncharova, I. Matveev // 7-th Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion, September 13-15, 2011, Las Vegas, Nevada, USA. – pp. 51-53.

20. Serbin S. Theoretical investigation of a multistage plasma coal vortex gasifier / S. Serbin, N. Goncharova, I. Matveev // 8-th Int. Conference on Plasma Assisted Technologies, February 18-21, 2013, Rio de Janeiro, Brazil. – pp. 128-131.

21. Matveev I., Vashcilenko N., Serbin S., Goncharova N. Combined cycle gas turbine power plant with integrated plasma coal gasification // 8-th Int. Conference on Plasma Assisted Technologies, February 18-21, 2013, Rio de Janeiro, Brazil. – Pp. 193-196.

22. Serbin S. Theoretical investigation of plasma assisted conversion of natural gas into synthesis gas and acetylene / S. Serbin, N. Goncharova, I. Matveev // 9-th Int. Conference on Plasma Assisted Technologies, June 23-26, 2014, Saint Petersburg, Russian Federation. – Pp.27-29.

23. Сербин С. И. Исследование рабочих процессов камеры сгорания ГТД с применением RQL-технологии сжигания синтетического газа / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали V Міжн. наук.-техн. конф. – Миколаїв:НУК, 2014. – С. 231-232.

23. Сербин С. И. Исследование рабочих процессов камеры сгорания ГТД с применением RQL-технологии сжигания синтетического газа / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали V Міжн. наук.-техн. конф. – Миколаїв:НУК, 2014. – С. 231-232.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві:

[1] – розробка математичної моделі робочих процесів в камері згоряння ГТД та розрахунок параметрів; [2, 12-14] – дані досліджень процесів газифікації вугілля; [3] – результати аналізу способів газифікації вугілля різного складу; [4] – результати розрахунків процесів плазмової газифікації вугілля; [5] – розрахунок процесів в окремих вузлах схеми комплексної переробки вугілля; [6, 11, 19-21, 23] – розробка математичної моделі робочих процесів в камері згоряння ГТД та їх розрахунок, розробка конструктивних модифікацій камер згоряння для впровадження RQL-технології спалювання та розробка рекомендацій щодо діапазону теплотворної здатності синтетичного палива; [7, 10, 15-18] – розробка математичної моделі робочих процесів в камері згоряння ГТД, що працює на синтез-газі, та їх розрахунок; [8, 23] – результати розрахунків процесів плазмової конверсії природного газу; [9] – розробка конструктивних модифікацій камери згоряння ГТД потужністю 2,5 МВт для впровадження RQL-технології спалювання палива.

АНОТАЦІЯ

Гончарова Н. О. Вдосконалення малоemisійної камери згоряння ГТД, що працює на продуктах плазмохімічної переробки вугілля. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2015.

Дисертація присвячена вдосконаленню характеристик камер згоряння газотурбінних двигунів, що працюють на продуктах плазмохімічної переробки високозольного вугілля, використанням технології спалювання RQL. Розроблено практичні рекомендації по вдосконаленню камер згоряння ГТД, що працюють на синтез-газі, які дозволяють знизити розрахункові викиди оксидів азоту у вихідному перерізі до 29 ppm при збереженні рівня викидів оксидів вуглецю та незначному збільшенні втрат повного тиску в камері, що відповідає сучасним міжнародним екологічним вимогам.

Розроблено узагальнену схему та математичну модель комплексу з внутрішньоцикловою плазмохімічною переробкою високозольного вугілля та наступним виробленням електроенергії, що дозволяє проводити дослідження і вибирати раціональні параметри подібних енергетичних систем з урахуванням властивостей вугілля різних родовищ.

Ключові слова: газотурбінний двигун, камера згоряння, синтез-газ, плазмохімічна переробка, вугілля, технологія спалювання RQL, математична модель.

АННОТАЦИЯ

Гончарова Н. А. Совершенствование малоэмиссионной камеры сгорания ГТД, работающей на продуктах плазмохимической переработки углей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2015.

Диссертация посвящена совершенствованию характеристик камер сгорания газотурбинных двигателей, работающих на продуктах плазмохимической переработки высокозольных углей, использованием технологии сжигания RQL.

Разработана обобщенная схема и математическая модель комплекса с внутрицикловой плазмохимической переработкой высокозольных углей, а также сформирован комплекс расчетных программ, позволяющий исследовать и проектировать энергетический комплекс под любой заданный ГТД необходимой мощности с использованием в качестве сырья углей различных месторождений, свойства которых известны. Определены рациональные значения суммарных коэффициентов избытка окислителя в процессах плазмохимической газификации углей различного состава: для воздушной газификации 0,35-0,45, для кислородной и кислородно-паровой газификации 0,3-0,35, которые обеспечивают максимальное содержание молекулярного водорода и оксида углерода в синтез-газе для использования в камере сгорания ГТД.

Создана универсальная математическая модель химически реагирующих потоков в камерах сгорания ГТД, работающих на синтез-газе различного состава, а также в системах плазмохимической газификации углей, позволяющая корректно прогнозировать аэродинамические и химические процессы в топливосжигающих устройствах. Предложены и верифицированы детальные кинетические механизмы окисления синтетических топлив, позволяющие прогнозировать распределение температур и концентраций химических компонентов в отдельных элементах энергетического комплекса по плазмохимической переработке высокозольных углей.

Разработаны практические рекомендации по выбору рациональных геометрических и режимных параметров камеры, позволяющие снизить расчетные выбросы оксидов азота в выходном сечении до 29 ppm при сохранении уровня выбросов оксидов углерода и

незначительном увеличении потерь полного давления в камере, что соответствует современным международным экологическим требованиям. Установлено, что при работе камеры сгорания ГТД на синтез-газе минимальное значение низшей теплотворной способности топлива, обеспечивающее его эффективное сгорания без дополнительной подачи природного газа, составляет около 20 МДж/кг

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, синтез-газ, плазмохимическая переработка, уголь, технология сжигания RQL, математическая модель.

SUMMARY

Goncharova N. A. Improving GTE low-emission combustor working on the products of plasma chemical coal processing.

The thesis for the scientific degree of the candidate of technical sciences on specialty 05.05.03 – Engines and power plants. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, 2015.

The thesis is devoted to improving the characteristics of the GTE combustor, working on the products of plasma chemical high-ash coal processing, by using RQL combustion technology. Practical recommendations to improve the GTE combustors working on synthesis gas, which can reduce NO_x calculated emission up to 29 ppm in the exit section while retaining a carbon monoxide emission level and a slight increase in total pressure loss in the chamber, are developed.

The general schematic and mathematical model of a power complex for high-ash coal processing into synthesis gas with further power production are developed, that allows researching and choosing rational parameters of similar power systems based on coal properties of different fields.

Key words: gas turbine engine, combustor, synthesis gas, plasma chemical processing, coal, RQL combustion technology, mathematical model.