

Голові спеціалізованої вченої ради
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова
д-ру. техн. наук, професору
Митрофанову Олександру Сергійовичу

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента, д-ра техн. наук, доцента, завідувача кафедри “Технічної теплофізики і суднових паровиробних установок” Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова **Кузнецова Валерія Валерійовича** на дисертаційну роботу **Шмаркова Олександра Андрійовича** на тему: «Ефективність камери згоряння газотурбінного агрегату контактного типу, що працює на водні» в галузі знань 14 – Електрична інженерія за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування, подану до захисту у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова.

Вивчення дисертації та опублікованих праць дає підстави для розгорнутої характеристики результатів дослідження Шмаркова Олександра Андрійовича та визначення відповідності його дослідження критеріям і нормативним вимогам «порядку присудження наукових ступенів» МОН України до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Актуальність теми дослідження

У роботі Шмаркова О.А. проаналізовано та науково підтверджено перспективність застосування чистого водню як палива для камер згоряння контактних газотурбінних установок. Враховуючи сучасний етап розвитку енергетики та морського транспорту, який характеризується жорсткими вимогами щодо декарбонізації та радикального зниження викидів парникових газів, запропонований перехід на екологічно нейтральний вид палива - чистий водень - є одним із найбільш перспективних напрямків обмеження техногенного впливу. Проте пряме впровадження водневого палива у традиційних газотурбінних двигунах стримується низкою технічних викликів, пов'язаних із високою швидкістю поширення полум'я, ризиками проскоку факела та підвищеними викидами оксидів азоту. Застосування контактних газотурбінних агрегатів із впорскуванням пари дозволяє ефективно вирішити ці проблеми. Відтак, дослідження робочих процесів у таких системах є критично важливим для створення нового покоління високоефективних і екологічно безпечних енергетичних комплексів.

Оформлення дисертації

Структура та обсяг дисертації зумовлені логікою дослідження та повністю відповідають чинним вимогам законодавства. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, що містить 118 найменувань, та додатків. Повний обсяг дисертації становить 157 сторінок, включаючи 42 рисунки та 8 таблиць.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірності і новизна

Особливу увагу здобувачем в дослідженні приділено специфіці кінетики високотемпературного окиснення водню в умовах впорскування водяної пари в камеру згоряння, що є характерним для термодинамічного циклу контактних установок. Розроблені математичні моделі та проведені числові симуляції робочих процесів дозволили детально описати динаміку вигорання паливно-повітряної суміші, визначити оптимальні параметри зони змішування та отримати нові дані про рівні емісії оксидів азоту на виході з камери згоряння. Отримані результати не лише розширюють теоретичні уявлення про особливості організації згоряння водню як палива ГТД, а й формують надійне підґрунтя для інженерного проєктування та модернізації проточних частин перспективних суднових і стаціонарних газотурбінних агрегатів.

Достовірність отриманих результатів

Достовірність отриманих результатів ґрунтується на застосуванні сучасного розрахункового інструментарію та апробованих методів числового моделювання. Репрезентативність сформованих математичних моделей підтверджується коректністю прийнятих фізичних припущень, які детально відображають термогазодинаміку процесів водневого згоряння. Наукові висновки роботи характеризуються внутрішньою логічною несуперечливістю, добре узгоджуються з фундаментальними принципами проєктування проточних частин газотурбінних установок.

Повнота викладення основних результатів дослідження

Матеріали дисертаційного дослідження знайшли відображення у 14 наукових публікаціях, що повністю розкривають його зміст. До розряду основних належать 7 статей, зокрема, 4 опубліковано у фахових виданнях України категорії «Б», з них одна – без співавторів, а 3 опубліковано в іноземних виданнях, що індексуються наукометричними базами Web of Science Core Collection та Scopus та віднесені до квартилю Q4. Додатково, розробки здобувача оприлюднено у вигляді 7 матеріалів доповідей на міжнародних конференціях, одна з яких підготовлена одноосібно.

Апробація результатів дисертації

Ключові наукові положення та практичні результати роботи пройшли широку апробацію та здобули позитивну оцінку наукової спільноти. Зокрема, матеріали дослідження доповідалися на VII–VIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (Миколаїв, 2022, 2024), XI Міжнародній конференції «Суднова енергетика: стан і проблеми» (Миколаїв, 2023), а також на XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2025). Міжнародний рівень дискусії забезпечено участю у XIX International Scientific and Practical Conference «Innovative Approaches to Solving Scientific Problems» (Токіо, 2023) та 29th International Scientific Conference «Transport Means 2025» (Клайпеда, 2025).

Огляд змісту дисертації

Матеріал у роботі розподілено наступним чином:

У **вступі** доведено актуальність обраної теми з урахуванням сучасного вектора розвитку науки й техніки, визначено взаємозв'язок дослідження з наявними науковими працями. Автор коректно окреслює предмет та об'єкт аналізу, ставить мету й диференціює її на низку взаємопов'язаних завдань. Описано використану методологічну базу та інструменти верифікації результатів. Репрезентовано наукову новизну, практичну цінність дисертації, а також наведено повні відомості про видані статті й доповіді на науково-технічних форумах.

У **першому розділі** виконано критичний аналітичний огляд світового досвіду та сучасного стану розробок у галузі інтеграції чистого водню як базового палива для контактних газотурбінних агрегатів. Автор детально аналізує наявні конструктивно-технологічні рішення, спрямовані на створення високоефективних камер згоряння. Окрему увагу приділено оцінці потенціалу та експлуатаційної специфіки впровадження контактних ГТД на судах типу FPSO. Глибоке узагальнення опрацьованої наукової періодики дозволило здобувачеві чітко окреслити наявні наукові напрями та аргументувати доцільність проведення цього дисертаційного дослідження.

Другий розділ присвячений формуванню комплексної методики числового дослідження процесів у камері згоряння КГТА на водні. Математичний опис, наведений у роботі, дозволяє адекватно відтворити кінетику водневого згоряння, явища теплопередачі та гідродинамічні параметри турбулізованого середовища. Здобувачем деталізовано прикладні аспекти адаптації розрахункових сіток і граничних умов, а також представлено методи числового розв'язання базових диференціальних рівнянь за допомогою інструментів промислового CFD-моделювання.

У третьому розділі запропоновано принципову схему гібридної газо-паротурбінної установки, яка конструктивно об'єднує базовий ГТД простого циклу з теплоутилізаційним контуром та контактний газотурбінний агрегат із технологією ступінчастого впорскування водяної пари безпосередньо в камеру згоряння. Здобувачем сформовано комплексну математичну модель для розрахунку термогазодинамічних процесів у ключових вузлах цієї комбінованої енергосистеми. На основі розробленого апарату отримано результати теоретичного аналізу, які детально описують характер трансформації визначальних робочих параметрів установки в широкому діапазоні її поточних експлуатаційних навантажень.

Четвертий розділ роботи присвячений детальному висвітленню числового алгоритму та аналізу термогазодинаміки процесів в камері згоряння КГТА з двоступінчастим підведенням пари. У межах розділу репрезентовано 3D-модель геометрії та параметри відповідної розрахункової сітки, згенерованої на базі тетраедричних елементів. Шляхом просторового моделювання локальних фізико-хімічних явищ у зоні горіння із впорскуванням водяної пари здобувачеві вдалося визначити оптимальний баланс між масовою витратою екологічної пари та масовою витратою повітря через компресор.

У п'ятому розділі розроблено еквівалентну реакторну модель камери згоряння з впорскуванням пари, адаптовану під умови спалювання водневого палива, а також здійснено багатокритеріальну оптимізацію параметрів камери згоряння з метою мінімізації її негативного екологічного впливу. Доведено, що ефективними важелями пригнічення термічного утворення оксидів азоту є зменшення площі прохідного перерізу лопаткового завихрювача, оптимізація співвідношення між масовими витратами первинного і вторинного повітря, а також збільшення частки екологічної пари відносно енергетичної. На основі розрахунків зафіксовано раціональні межі цих режимних чинників, які гарантують відповідність рівнів емісії суворим європейським екологічним регламентам для газотурбінних комплексів.

Результати проведених досліджень стали підґрунтям для розробки комплексних науково обґрунтованих **практичних рекомендацій** щодо конструктивної модернізації камери згоряння вітчизняного контактного газотурбінного агрегату типу «Водолій». Запропоновані технічні рішення спрямовані на забезпечення ефективного та безпечного переведення зазначеного типу комбінованих агрегатів на спалювання екологічно чистого водневого палива з мінімальними емісійними втратами.

Наукове і практичне значення отриманих результатів

Наукове значення проведеного дослідження полягає у розширенні теоретичних уявлень про закономірності протікання високотемпературних робочих процесів у камерах згоряння контактних газотурбінних установок. Зокрема, вперше обґрунтовано ефективність спалювання чистого водню в газотурбінних агрегатах контактного типу з впорскуванням пари в камеру згоряння на основі вдосконаленої тривимірної математичної моделі процесів турбулентного горіння, яка відрізняється від відомих наявністю кінетичного механізму окиснення водню з урахуванням ступінчастого підведення пари по довжині жарової труби. У роботі вперше комплексно вивчено специфіку кінетики спалювання чистого водню за умов позонного ступінчастого підведення перегрітої водяної пари по довжині жарової труби. Вперше отримано, що в камері згоряння зі ступінчастим впорскуванням пари раціональні значення відношення масових витрат первинного та вторинного повітря становлять 0.8-0.9, а відношення масових витрат екологічної та енергетичної пари становлять 1.0-1.1, що забезпечує емісію оксидів азоту менше 25 ppmvd у перерахунку на суху суміш з 15 % вмістом кисню. Вдосконалено підхід до аналізу параметрів, що впливають на характеристики вигорання сумішей водню з повітрям, який ґрунтується на використанні реакторної моделі камери згоряння ГТД.

Практичне значення отриманих результатів визначається розробкою системи інженерних рішень для інтеграції водневого палива в цикли КГТА, на базі яких сформовано перспективну конструктивну конфігурацію камери згоряння. Створений автором комплекс, що поєднує просторову CFD-модель та реакторну модель на основі детального кінетичного механізму окиснення водню, є гнучким інструментом прогнозування термогазодинамічної та екологічної ефективності теплових двигунів.

Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертації

1. В роботі в явному вигляді не представлена верифікація математичної моделі з наявними результатами теоретичних та експериментальних досліджень.

2. У роботі представлено екологічні показники роботи камери згоряння на усталеному режимі роботи без розгляду процесу виходу на режим номінальної потужності, що, своєю чергою, теж представляє інтерес з точки зору екологічної ефективності.

3. Потребує додаткових роз'яснень доцільність вибору моделей Finite Rate/Eddy Dissipation та Eddy Dissipation Concept хімічної взаємодії у порівнянні з моделлю Large Eddy Simulation.

4. Потребує додаткових роз'яснень доцільність вибору $k - \varepsilon$ моделі турбулентності для розрахунків процесів турбулентного обміну.

5. Відсутнє дослідження впливу випромінювання на температуру стінок жарових труб камери згоряння.

6. У зв'язку з суттєвою різницею у властивостях водню відносно вуглеводневого палива, доцільно було проаналізувати процес запуску камери на водневому паливі.

7. Більш детального роз'яснення потребує організація роботи гібридної газо-паротурбінної установки.

Зазначені зауваження не є принциповими й не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації, а також не знижують теоретичного й практичного значення виконаного дослідження.

Загальний висновок та оцінка дисертації

З огляду на зазначене вище, можна зробити висновок, що представлена до захисту дисертаційна робота «Ефективність камери згоряння газотурбінного агрегату контактного типу, що працює на водні» є цілісною, завершеною кваліфікаційною науковою працею. У дисертації розв'язано важливу науково-прикладну задачу щодо підвищення ефективності та екологічної чистоти камер згоряння газотурбінних агрегатів контактного типу, що працюють на чистому водні. За своєю актуальністю, науковим рівнем, новизною та практичною цінністю робота відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. зі змінами і доповненнями. Вважаю, що Шмарков Олександр Андрійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування, галузь знань 14 – Електрична інженерія.

Офіційний рецензент,

д-р технічних наук, доцент,
завідувач кафедри “Технічної теплофізики
і судових паровиробних установок”
Національного університету
кораблебудування
імені адмірала Макарова

Валерій КУЗНЕЦОВ