

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента, завідувача кафедри двигунів
внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
Міністерства освіти і науки України

Гогоренка Олексія Анатолійовича на дисертаційну роботу
Шмаркова Олександра Андрійовича «Ефективність камери згоряння
газотурбінного агрегату контактного типу, що працює на водні»,
що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14
– електрична інженерія за спеціальністю 142 – енергетичне
машинобудування.

Загальні положення

Дисертаційне дослідження Шмаркова О.А. направлене на розширення уявлень про фізико-хімічні процеси, які протікають у камері згоряння з впорскуванням пари газотурбінного агрегату контактного типу при роботі на чистому водні. Орієнтація на проєктування та інтеграцію енергоефективних технічних рішень у сегменти стаціонарного та судового енергомашинобудування шляхом комплексного впровадження інноваційного обладнання з використанням передових науково обґрунтованих конфігурацій, яка корелює зі світовими тенденціями розвитку машинобудування, енергетики та транспорту для зменшення негативного екологічного впливу, зумовлює **актуальність** даного дослідження. Так, європейські програми, наприклад, European Green Deal, мають на увазі застосування альтернативних видів палива як спосіб досягнення кліматичної нейтральності. Ідея модернізації та переведення на чистий водень вітчизняної газотурбінної установки типу «Водолій» повністю відповідає даному **запиту практики**.

За **мету роботи** було обрано підвищення ефективності та екологічної чистоти камер згоряння газотурбінних агрегатів контактного типу, що працюють на чистому водні, за рахунок вибору їх раціональних режимних і геометричних параметрів. Мета досягнута за допомогою розгалуження її на задачі та послідовного їх розв'язання.

Повнота викладення основних результатів дослідження та оформлення дисертації

Здобувачем обґрунтовано перспективність спалювання чистого водню в камерах згоряння контактних газотурбінних установок. Цей підхід відповідає глобальним трендам декарбонізації енергетичного машинобудування та мінімізації техногенного впливу на довкілля. Показано, що перехід від базових ГТД простого циклу, що працюють на вуглеводневому паливі, до складних КГТА на водні може одночасно розв'язувати питання енергоефективності та оптимізації екологічних параметрів енергосистем.

Дисертація оформлена згідно з вимогами чинного законодавства. Її структура включає вступ, 5 розділів, висновки, список використаних джерел

з 118 найменувань та додатки. Загальний обсяг роботи — 157 сторінок, у тому числі 42 рисунки та 8 таблиць.

Сформульовані в дисертації положення та отримані результати пройшли всебічне висвітлення у 14 наукових працях автора. Основні результати дослідження висвітлені у 7 працях: 4 яких опубліковано у вітчизняних журналах категорії «Б» та 3 у іноземних виданнях та індексуються наукометричними базами Scopus та Web of Science Core Collection. В рамках апробації пройшли обговорення на конференціях та ще 7 робіт опубліковано у матеріалах конференцій.

Апробація результатів дослідження

Основні висновки дисертаційного дослідження доповідалися, дискутувалися та були підтримані фахівцями на таких міжнародних науково-технічних заходах:

- VII–VIII конференції «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» Миколаїв, 2022, 2024 рр.;
- XI конференція «Суднова енергетика: стан і проблеми» Миколаїв, 2023 р.;
- XIX конференція «Innovative Approaches to Solving Scientific Problems» Tokyo, 2023 р.;
- XVI конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» Миколаїв, 2025 р.;
- 29-та конференція «Transport Means 2025», Клайпеда, 2025 р.

За якістю і кількістю опубліковані праці відповідають нормативно закріпленим законодавством вимогам щодо порядку присудження ступеня доктора філософії.

Зміст роботи.

У **вступній частині** всебічно доведено актуальність обраної теми з урахуванням сучасного вектору 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. У заключній частині вступу сформульовано наукову новизну, практичну цінність дисертації, а також наведено повні відомості про видані статті й доповіді на науково-технічних конференціях.

Перший розділ роботи відведено під ретельний аналіз науково-технічної бази, що стосується застосування екологічно чистого водневого палива в газотурбінних установках. У межах цього розділу систематизовано відомі світові підходи до проєктування й розрахунку вискоєфективних камер згоряння. Проаналізовано перспективність та технічні нюанси практичного використання контактних ГТД у специфічних умовах суден типу FPSO. На основі проведеного пошуку та аналізу джерел автор логічно вивів і довів необхідність виконання представленої дисертаційної роботи.

У **другому розділі** відображено теоретичні та практичні засади моделювання робочих процесів у камерах згоряння контактних

газотурбінних двигунів водневого типу. Запропонований математичний апарат інтегрує в собі опис кінетики окиснення палива, складного теплообміну та турбулентних вихрових структур. Окремо висвітлено етапи комп'ютерної реалізації розроблених моделей, включаючи числове розв'язання систем диференціальних рівнянь у CFD- програмному забезпеченні.

Третій розділ присвячено дослідженню принципової схеми гібридної газо-паротурбінної установки. Дана конфігурація поєднує класичний ГТД простого циклу, оснащений теплоутилізуючим контуром, та контактний ГТА із двоступінчастим підведення пари в камеру згоряння. Для оцінки ефективності вдосконалено математичну модель, що описує закономірності зміни характеристик гібридної газо-паротурбінної установки, що працює на водні, при різних рівнях споживаної електричної потужності.

У четвертому розділі висвітлено розрахунковий підхід до дослідження процесів у камері згоряння КГТА, яка працює на чистому водні за умов реалізації двоступінчастого впорскування пари. Автор описує розроблену просторову геометрію та геометричні моделі. Для дослідження роботи камери згоряння у процесі обчислень з використанням CFD-комплексів було використано як одноступінчасті кінетичні механізми окиснення палива, так і багаторівневі, що, своєю чергою, допомогло встановити раціональні співвідношення між витратами водяної пари та компресорного повітря.

У п'ятому розділі представлено розроблену автором реакторну модель камери згоряння КГТА за умов підведення пари та наведено результати оптимізації її характеристик для покращення екологічних показників. Розрахунковим шляхом підтверджено, що дієве зниження утворення шкідливих оксидів азоту досягається через зменшення прохідного перерізу лопаткового завихрювача, зниження коефіцієнта співвідношення первинного/вторинного повітря та підвищення кількості екологічної пари порівняно з енергетичною. Сформульовані **практичні рекомендації** щодо конструктивного вдосконалення камер згоряння ГТА з впорскуванням водяної пари, які сприяють покращенню організації робочого процесу, підвищенню стабільності горіння водню та зменшенню токсичності викидів.

Наукове значення роботи полягає у розширенні знань про фізико-хімічні процеси в камерах згоряння газотурбінних агрегатів контактного типу, що працюють на чистому водні з урахуванням ступінчастого підведення екологічної і енергетичної пари по довжині жарової труби. Зокрема, автором вперше деталізовано закономірності високотемпературного окиснення водневого палива в умовах впорскування водяної пари в високофорсованій камері згоряння. Сформований комплекс просторових і реакторних моделей створює базу для прогнозування локальної термогазодинаміки в проточних частинах перспективних енергетичних установок.

В результаті проведеного дослідження було сформульовано наступну **наукову новизну**: вперше обґрунтовано ефективність спалювання чистого водню в газотурбінних агрегатах контактного типу вітчизняного виробництва з впорскуванням перегрітої 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; вперше отримано закономірності реагування водню в високофорсованій камері згоряння ГТД при підведенні екологічної і енергетичної пари відповідно в первинну зону камери та зону розбавлення; вперше теоретичним шляхом отримано, що в камері згоряння газотурбінного агрегату контактного типу 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; вдосконалено підхід до аналізу основних параметрів, які впливають на характеристики вигорання сумішей водню з повітрям і перегрітою парою, який ґрунтується на використанні реакторної моделі камери згоряння ГТД, що являє собою сукупність реакторів ідеального змішування, проточних реакторів та адіабатичних змішувачів та враховує основні кінетичні фактори, які обумовлюють процеси згоряння палива.

Обґрунтованість наукових положень дисертації доведена застосуванням сучасних методів комп'ютерного моделювання. Фізична адекватність розрахункових моделей підтверджується їх відповідністю реальним термогазодинамічним процесам окиснення водню. Результати роботи демонструють належну збіжність із даними інших авторів, є логічно несуперечливими та повністю узгоджуються із сучасними принципами створення газотурбінних систем і камер згоряння.

Зауваження до дисертації

1. Потребує додаткових пояснень - чим вдосконалена тривимірна математична модель турбулентного горіння, запропонована автором, відрізняється від раніше відомих спрощених моделей?
2. З якою метою в числових CFD-розрахунках використовуються детальні багатоступінчасті кінетичні схеми?
3. Впорскування великої кількості перегрітої пари суттєво змінює теплофізичні властивості робочого тіла. В роботі не показано, як це вплине на корозійну та кавітаційну стійкість лопаткового апарату турбіни, що стоїть відразу за камерою згоряння?
4. У роботі детально описано зони подачі «екологічної» та «енергетичної» пари, але неясно, як технічно реалізовано систему автоматичного регулювання співвідношення цих потоків при зміні навантаження?
5. Впорскування великої кількості пари у високофорсовану камеру згоряння може призвести до збільшення нерівномірності температурного поля на виході з неї. Як режим роботи енергоустановки впливає на температурне поле перед сопловим апаратом турбіни?
6. При переході на водень густина палива падає, а об'ємні витрати газу різко зростають. Як розроблена методика враховує зміну кінетичної

енергії паливних струменів та їхню здатність «пробивати» зсувний потік повітря і пари для ефективного макрозмішування?

Висловлені зауваження мають дискусійний або уточнювальний характер, відтак жодним чином не применшують наукової вагомості отриманих автором результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку представленої дисертації.

Загальний висновок

З огляду на зазначене вище, можна стверджувати, що представлена до захисту дисертація «Ефективність камери згоряння газотурбінного агрегату контактного типу, що працює на водні» є цілісною, завершеною кваліфікаційною науковою працею. У роботі успішно розв'язано важливу науково-прикладну задачу щодо підвищення ефективності камери згоряння контактного газотурбінного агрегату з впорскуванням водяної пари, що працює на чистому водні. За своєю актуальністю, науково-теоретичним рівнем, новизною та прикладним потенціалом дисертаційне дослідження повністю відповідає чинним вимогам, що висуваються до праць на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Його автор, **Шмарков Олександр Андрійович**, беззаперечно заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування (галузь знань 14 – Електрична інженерія).

Рецензент,
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри двигунів внутрішнього
згоряння, установок та технічної експлуатації
Національного університету
кораблебудування імені
адмірала Макарова



Олексій ГОГОРЕНКО

24.07.2026

