

ВІДГУК

офіційного опонента, д-ра техн. наук, професора кафедри суднових технічних систем і комплексів Одеського національного морського університету Білоусова Євгена Вікторовича 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

1. Актуальність теми дослідження. У дисертації Шмаркова О.А. вирішується актуальне наукове завдання – встановлення закономірностей протікання фізико-хімічних процесів при спалюванні водню в камерах згоряння контактного типу за умови ступінчастої подачі пари. Актуальність теми дослідження визначається сучасними тенденціями декарбонізації суднобудівної та енергетичної галузей, що передбачають перехід до використання низьковуглецевих і безвуглецевих енергоносіїв. Одним із найбільш перспективних альтернативних палив у цьому контексті є водень, застосування якого сприяє суттєвому скороченню викидів парникових газів. Україна активно підтримує стратегічний вектор Європейського зеленого договору, поєднуючи свою кліматичну політику з ключовим завданням ЄС – досягнення повної кліматичної нейтральності до 2050 року. Відмітимо, що вітчизняна установка типу «Водолій» може розглядатися як об'єкт модернізації для досягнення поставленої мети.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна. Здобувачем розглянуто та обґрунтовано перспективність застосування чистого водню як палива для камер згоряння контактних газотурбінних установок. Такий підхід відповідає сучасному вектору промисловості щодо впровадження безвуглецевих енергоносіїв з метою мінімізації техногенного навантаження на довкілля, що узгоджується із глобальними трендами в галузі енергетичного машинобудування. Обґрунтовано, що перехід від ГТД простого циклу до складних КГТА, які функціонують на водні, може забезпечувати одночасне підвищення енергетичної ефективності та покращення екологічних характеристик енергосистем.

3. Достовірність отриманих результатів. Надійність та обґрунтованість наукових положень і висновків роботи базуються на застосуванні передових методів комп'ютерного моделювання та сучасного розрахункового інструментарію. Фізична адекватність прийнятих у математичній моделі допущень підтверджується їх відповідністю реальним

термогазодинамічним процесам спалювання водню. Отримані результати демонструють належну збіжність із незалежними даними інших авторів, а також характеризуються внутрішньою логічною несуперечливістю та повною узгодженістю із сучасними принципами проєктування газотурбінних систем і їх топкових пристроїв.

4. Повнота викладення основних результатів дослідження та апробація результатів дисертації. Дослідження за темою представлено 14 науковими працями, у яких викладено основні положення та результати виконаної роботи. Серед них 7 основних публікацій, зокрема 4 статті у наукових фахових виданнях України, кат. Б (одна з яких виконана одноосібно) та 3 статті в іноземних фахових виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus і Web of Science Core Collection (квартиль Q4). Крім того, результати дослідження оприлюднено у 7 матеріалах доповідей на міжнародних наукових конференціях, з яких 1 підготовлено без співавторів.

Основні положення і результати досліджень обговорювалися і отримали позитивні відгуки на таких заходах: VII-VIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (Миколаїв, 2022, 2024); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан і проблеми» (Миколаїв, 2023); XIX International Scientific and Practical Conference «Innovative Approaches to Solving Scientific Problems» (Tokyo, 2023); XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2025), 29th International Scientific Conference «Transport Means 2025» (Klaipeda, 2025).

5. Оформлення роботи. Дисертація оформлена відповідно до норм чинного законодавства та складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 118 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи становить 157 сторінок, у тому числі 42 рисунки і 8 таблиць.

6. Огляд змісту дисертації. У вступній частині дисертації обґрунтовано актуальність обраної тематики з урахуванням сучасних науково-технічних тенденцій. Висвітлено зв'язок виконаного дослідження з існуючими науковими розробками та визначено його місце у розвитку відповідного напрямку досліджень. Чітко визначено предмет і об'єкт аналізу, поставлено мету та розбито її на низку дослідницьких завдань. Представлено методологічну базу роботи та заходи, вжиті для забезпечення надійності й перевірки отриманих результатів. Наприкінці розділу визначено наукову новизну, практичну значущість дисертації, подано відомості щодо оприлюднення результатів у періодичних виданнях та їхнього представлення на конференціях.

Перший розділ присвячено аналітичному огляду сучасного стану розробок у сфері впровадження чистого водню як енергоносія для контактних

газотурбінних установок. Характеризовано наявні конструктивні та технологічні підходи до проектування вискоєфективних камер згоряння. Оцінено перспективність та специфіку експлуатації контактних ГТД на суднах типу FPSO. За результатами аналізу літературних джерел сформульовано та обґрунтовано доцільність виконання дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** висвітлено методику моделювання робочих процесів у топкових пристроях контактних газотурбінних двигунів на водневому паливі. За допомогою математичного інструментарію описано закономірності окиснення водню, теплообмінні процеси та характер турбулентності потоків. Розглянуто практичні аспекти реалізації розрахункових моделей і числового розв'язання систем диференціальних рівнянь із використанням програмного забезпечення класу CFD.

У **третьому розділі** представлено принципову схему розробленої схеми гібридної газо-паротурбінної установки, що об'єднує базовий ГТД простого циклу з ТУК та контактний ГТА, у камері згоряння якого здійснюється ступінчаста подача водяної пари. Представлено математичну модель для розрахунку процесів цієї комбінованої енергоустановки. Наведено результати теоретичного аналізу, що відображають характер зміни ключових параметрів роботи установки залежно від її поточного навантаження.

У **четвертому розділі** деталізовано методичний підхід до аналізу процесів у камері КГТА, що працює на чистому водні за умови двоступінчастого підведення водяної пари. Наведено опис створеної тривимірної геометрії та кінцево-різницевої сітки, побудованої на основі тетраедричних елементів. На основі просторового моделювання робочого процесу в камері згоряння із впорскуванням пари та з використанням одноступінчастої кінетичної схеми окиснення водню визначено оптимальні пропорції між витратами «екологічної» пари і повітряного потоку, що надходить із компресора установки.

У **п'ятому розділі** розроблено еквівалентну реакторну модель камери згоряння з впорскуванням пари для умов спалювання водню та виконано багатокритеріальну оптимізацію її параметрів, спрямовану на мінімізацію негативного впливу процесу горіння на довкілля. Встановлено, що дієвими інструментами пригнічення генерації оксидів азоту є зміна конструкції завихрювача, зниження відношення витрат первинного і вторинного повітряних потоків, а також збільшення відношення витрат екологічної та енергетичної пари. Визначено раціональні діапазони зазначених режимних параметрів, які передбачають відповідність показників емісії європейським стандартам щодо шкідливих викидів ГТУ.

На основі отриманих даних сформовано комплекс **практичних рекомендацій** стосовно модернізації конструкції камер згоряння вітчизняних контактних газотурбінних агрегатів при їх роботі на чистому водні.

7. Наукове і практичне значення отриманих результатів. Наукове значення роботи Шмаркова О.А. полягає у поглибленні й розширенні фундаментальних уявлень щодо закономірностей перебігу у камерах згоряння контактних газотурбінних установок. Вперше отримано фізико-хімічні закономірності реагування водню в високофорсованій камері згоряння ГТД при підведенні екологічної і енергетичної пари відповідно в первинну зону камери та зону розбавлення для зменшення викидів оксидів азоту і підвищення питомої потужності енергетичної системи. Також вперше отримано, що в камері згоряння КГТА раціональні значення відношення масових витрат первинного та вторинного повітря при сталій їх сумарній витраті становлять 0.8-0.9, а відношення масових витрат екологічної та енергетичної пари при сталій їх сумарній витраті становлять 1.0-1.1, що забезпечує емісію оксидів азоту менше 25 ppm vd. Вдосконалено підхід до аналізу параметрів, які впливають на характеристики вигорання сумішей водню з повітрям, який ґрунтується на використанні реакторної моделі камери згоряння ГТД, що являє собою сукупність реакторів ідеального змішування, проточних реакторів та адіабатичних змішувачів.

Практичне значення отриманих результатів становить комплекс інженерних рекомендацій щодо інтеграції водневого палива в контактні газотурбінні установки. На їх основі сформовано перспективну конструктивну схему камери згоряння КГТА. Створені автором просторова математична модель та реакторна модель, що базується на детальній кінетиці окиснення водню, є ефективними інструментами для прогнозування термогазодинамічних та екологічних показників сучасних ГТУ. Запропонований розрахунковий інструментарій дозволяє здійснювати оптимізацію конструктивних і режимних параметрів камер згоряння для сучасних ГТА на етапі їх проєктування.

8. Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертації.

1. В розділі, що стосується використання водню в ГТД, потрібно було звернути більшу увагу на попередні роботи, що проводились в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова.

2. Потребує додаткових пояснень значення емпіричних констант в рівняннях перенесення характеристик турбулентності, які використано при описі моделі турбулентного горіння водню.

3. Не ясно, чи однакові параметри перегрітої пари на виході утилізаційних парогенераторів після двигуна простої теплової схеми і контактного ГТД (рис. 3.1).

4. Потребує роз'яснення стосовно вибору початкових параметрів для тривимірного аналізу робочих процесів в високо форсованій камері згоряння.

5. Яким чином результати розрахунків з використанням реакторної моделі камери згоряння використовуються для оптимізації її геометричних і режимних параметрів.

6. Не ясно, який з запропонованих методів зменшення викидів оксидів азоту при роботі контактного ГТД на водні найбільш практичний для двигунів вітчизняного виробництва.

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

9. Загальний висновок та оцінка дисертації. Виходячи з вищевикладеного вважаю, що представлена до захисту дисертація «Ефективність камери згоряння газотурбінного агрегату контактного типу, що працює на водні» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, яка вирішує актуальну науково-прикладну задачу 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., а також змінами та доповненнями, що внесені в цей порядок Постановою кабінету міністрів України № 507 від 03.05.2024 р, а Шмарков Олександр Андрійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування, галузь знань 14 – Електрична інженерія.

Офіційний опонент,
д-р техн. наук, професор,
професор кафедри суднових технічних
систем і комплексів
Одеського національного морського
університету

Євген БІЛОУСОВ



Засвідчую підпис

Факівень ВК

Євгена Білоусова
(підпис)