

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України

Сагіна Сергія Вікторовича 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 за спеціальністю 142 – енергетичне машинобудування (галузь знань 14 – електрична інженерія). Дисертацію виконано в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

Загальні положення

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – визначення найбільш раціональних режимів та умов функціонування камери згоряння газотурбінного агрегату на чистому водні з впорскуванням водяної пари та підвищення ефективності її роботи. Газотурбінні агрегати відносяться до поширених теплових двигунів, що використовуються у стаціонарній енергетиці та на різних видах транспорту. Сучасні вимоги, що висувуються до енергетичних комплексів (у тому числі газотурбінних агрегатів), охоплюють не лише їхні енергетичні показники, але також поширюються на екологічні параметри їхньої експлуатації. Перш за все, це відноситься до зниження вуглецевого сліду та декарбонізації засобів транспорту. Важливість розв'язання цього завдання визначається програмою Євросоюзу з декарбонізації – European Green Deal, яка прийнята з метою досягнення кліматичної нейтральності Європейських країн до початку 2050 року та передбачає досягнення майже нульового викиду парникових газів і нульового сумарного забруднення довкілля. За ініціативою ЄС також прийнята програма EU4 Climate Resilience, яка спрямована на підтримку «зеленого» переходу, посилення декарбонізації, підвищення енергетичної безпеки та підвищення кліматичної стійкості у країнах Східного партнерства, до яких належить Україна.

Обмежена кількість морських суден, що використовують газотурбінну установку як джерело електричної або механічної енергії, відповідним чином впливає на кількість наукових досліджень, що присвячені питанню визначення ефективності та екологічності роботи цих теплових двигунів. Разом з цим, це додатково визначає їхню затребуваність та **актуальність**.

Аналіз існуючого стану розв'язання завдання забезпечення нульового значення емісії парникових газів, оцінка можливості використання безвуглецевих видів палива в газотурбінних агрегатах, огляд перспективних способів подачі рідкого та газоподібного палива у камеру згоряння газотурбінного агрегату контактного типу, необхідність захисту довкілля під час експлуатації енергетичних установок зумовили визначений **запит практики**, спрямований на розробку та адаптацію енергоефективних

технологій в стаціонарну та суднову енергетику шляхом комплексного впровадження новітніх установок, визначення діапазонів їхніх досяжних параметрів з розробкою науково-обґрунтованих перспективних схемних рішень, які забезпечують підвищення ефективності використання паливних ресурсів, декарбонізацію енергетичних систем, мінімізацію викидів шкідливих речовин в довкілля.

Головним завданням наукового дослідження визначено 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.

Розв'язання головного завдання запропоновано та досягнуто шляхом синтезу результатів вирішення наступних **додаткових завдань**:

- обґрунтування можливості роботи камер згоряння газотурбінних агрегатів контактного типу на чистому водні;

- визначення науково обґрунтованих напрямків створення високоефективних камер згоряння газотурбінних агрегатів, що працюють на водні;

- вдосконалення математичних моделей робочого процесу камери згоряння з впорскуванням водяної пари, що працює на водні;

- обґрунтування кінетичних схем горіння водню в камері згоряння з впорскуванням пари;

- теоретичні дослідження аеродинаміки потоків та утворення токсичних компонентів в камері згоряння газотурбінного агрегату, що працює на водні;

- розробка практичних рекомендацій з вдосконалення камери згоряння газотурбінних агрегатів контактного типу, що працюють на водні.

До наукової новизни результатів дисертаційного дослідження слід віднести **вперше** обґрунтовану 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 детального кінетичного механізму окиснення водню з урахуванням ступінчастого підведення пари по довжині жарової труби; **вперше** отримані фізико-хімічні закономірності реагування водню в високофорсованій камері згоряння газотурбодвигуна 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; **вперше** отримане теоретичним шляхом ствердження, що в камері згоряння газотурбінного агрегату контактного типу зі ступінчастим впорскуванням пари раціональні значення відношення масових витрат первинного та вторинного повітря під час їхньої сталої сумарної витраті становлять 0,8...0,9, а відношення масових витрат екологічної та енергетичної пари під час їхньої сталої сумарної витраті становлять 1,0...1,1, що забезпечує емісію оксидів азоту менше 25 ppmvd у перерахунку на суху суміш з 15 % вмістом кисню та відповідає

Європейським нормам на викиди токсичних компонентів газотурбінними двигунами; **удосконалений підхід** до аналізу основних параметрів, які впливають на характеристики вигорання сумішей водню з повітрям і перегрітою парою, який ґрунтується на використанні реакторної моделі камери згорання газотурбодвигуна, що являє собою сукупність реакторів ідеального змішування, проточних реакторів та адіабатичних змішувачів та враховує основні кінетичні фактори, які обумовлюють процеси згорання палива; **такий, що одержав подальший розвиток** метод числового тривимірного прогнозування енергетичних і екологічних характеристик камер згорання газотурбодвигуна, що працюють на водні, на основі детальних хімічних механізмів реагування, які враховують утворення проміжних нестабільних з'єднань, а також утворення і розкладання оксидів азоту.

Обґрунтованість отриманих наукових результатів підтверджено: проведенням широких узагальнень наявних інформаційних джерел; використанням методів апробованого математичного апарату; практичною перевіркою основних положень, що висувуються, під час моделювання; апробацією основних положень роботи на науково-практичних конференціях різного рівня та в друкованих виданнях.

Практичне значення полягає в розробці практичних рекомендацій з використання водневого палива в газотурбінних агрегатах контактного типу, на підставі яких розроблено конструктивну схему камери згорання контактного газотурбінного агрегату потужністю 55,27 МВт зі ступінчастим підведенням перегрітої пари по довжині жарової труби, а також запропонованої тривимірної математичної моделі робочого процесу в камері згорання газотурбодвигуна з впорскуванням пари і використанням водню як основного палива, та реакторної моделі, яка, на відміну від існуючих, враховує детальні кінетичні особливості вигорання водню та здатна прогнозувати енергетичні і екологічні характеристики найсучасніших газотурбінних агрегатів.

Повнота викладення основних результатів в наукових виданнях

Результати дисертаційного дослідження повністю викладені в чотирнадцяти наукових працях: чотири – у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку наукових фахових видань України (категорії Б) та рекомендовані МОН України для публікації результатів дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії; три – у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus; сім – у збірках доповідей міжнародних науково-практичних конференцій, що проводились в Україні та у інших країнах.

Особистий внесок здобувача у сумісних публікаціях є підтвердженим.

Публікації охоплюють період з 2023 по 2025 рр., що свідчить про послідовність та взаємопов'язаність виконаних досліджень. Публікації повністю відображають основний зміст та висновки дисертаційного дослідження.

Структура та обсяг дисертації. Відповідність дисертації та її змісту встановленим вимогам

Дисертація складається з анотації (українською та англійською мовами), списку прийнятих скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку.

Загальний обсяг дисертаційного дослідження становить 157 сторінок. Основний зміст роботи викладено на 123 сторінках. До загального обсягу входять анотація українською та англійською мовами на 15 сторінках, 8 таблиць, 42 рисунки, 14 сторінок переліку використаних джерел із 118 найменувань, 2 додатки на 6 сторінках.

Дисертаційна робота є завершеним та цілісним дослідженням з чіткою структурою, логічним та послідовним викладанням матеріалу та результатів. Зміст дисертації узагальнює дослідження здобувача. Дисертацію написано сучасною науково-технічною мовою. Стиль викладу матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність її сприйняття. Оформлення дисертації відповідає вимогам пп. 6, 7 «Порядку присудження ступеня доктора філософії ...», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Зауваження до дисертації

1. У п. 1.2 «Визначення науково обґрунтованих напрямків створення високоефективних камер згоряння газотурбінних агрегатів, що працюють на водні» здобувачем наведено аналіз різноманітних варіантів комплектації екологічно чистих камер згоряння газотурбінних агрегатів та виконано аналіз впливу на екологічні показники технологій забезпечення систем горіння. При цьому не визначено вплив на емісію оксидів вуглецю та оксидів азоту такого показника, як глибина регулювання форсунки – величина, яка визначає стійкість подачі палива на різних навантаженнях газотурбінної установки.

2. Як приклад можливостей використання контактного газотурбінного агрегату на морських судах, здобувачем у п. 1.3 розглянуто судно класу Floating Production, Storage and Offloading (FPSO). При цьому більш характерним випадком встановлення газових турбін та використання їхньої потужності для забезпечення енергетичних потреб є судна, що виконують пасажирські перевезення – судна класів Cruise Ships та Passenger Ships. Допоміжна установка цих суден (яку складають газотурбінні агрегати) за потужністю перебільшує головну, більшу частину експлуатаційного періоду ці судна (аналогічно суднам класу FPSO) здійснюють у екологічних районах. Тому цей клас суден також доцільно було включити до огляду.

3. У розділі 1 здобувачем введено поняття «екологічна чистота камер згоряння газотурбінних агрегатів контактного типу», однак не наведено, які ознаки це поняття визначає – виключно діоксиди вуглецю CO₂ чи комплекс показників – оксиди вуглецю CO та CO₂, оксиди азоту NO_x, тверді незгорілі частки РМ.

4. У п. 3.1 «Розробка принципової схеми гібридної газо-паротурбінної установки, що працює на водні» наведено принципову схему комбінованої газо-паротурбінної установки з гібридним циклом (рис. 3.1), на якій не вказано основні температурні показники робочих речовин в характерних точках циклу. Це не дає можливості оцінити його ефективність.

5. У п. 3.2 «Математична модель гібридної газо-паротурбінної установки, що працює на водні» наведено комплекс рівнянь (вирази (3.1)–(3.138)), які, відповідно до посилань, належать автору – джерело [89] Сербін С.І., Шмарков О.А. Параметри гібридної газопарової установки, що працює на водневому паливі. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2023. № 1 (490). С. 103–110. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2023.1\(490\).13](https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).13) та іншим науковцям – джерело [90] Романовський Г.Ф., Ващиленко М. В., Сербін С.І. Теоретичні основи проєктування суднових газотурбінних агрегатів: навч. посіб. Миколаїв: УДМТУ, 2003. 304 с. Деякі з цих рівнянь загальновідомі, або не несуть принципову інформаційну складову. Це зосереджує увагу на основних рівняннях математичної моделі – таких, що визначають термодинамічну та енергетичну ефективність розробленого здобувачем циклу.

6. Результати дослідження параметрів гібридної газо-паротурбінної установки, що працює на водні, які наведені у п. 3.3, свідчать, що в цьому випадку суттєво підвищуються всі показники газотурбінного двигуна UGT32000 виробництва АТ НВКГ «Зоря-Машпроект» (м. Миколаїв), що обрано як базовий – перш за все коефіцієнт корисної дії та ефективна потужність. При цьому не визначено, за рахунок чого досягається цей ефект, а також як це впливає на динамічні характеристики газотурбінного двигуна та пов'язаних з ним споживачів енергії.

7. Рис. 4.1 «Тривимірна геометрична модель камери згоряння» передбачає підведення до камери згоряння водню та екологічної пари за допомогою загальної форсунки. Ці речовини мають різні температури та, скоріш за все, підводяться до камери згоряння з різним тиском. Це може викликати порушення суцільності їхніх потоків, а також конденсацію та подальше порушення процесу згоряння. Цим питанням не приділено уваги під час опису роботи установки.

8. У таблиці 4.4 «Параметри камери згоряння для розрахунків з застосуванням детальних кінетичних механізмів» наведено значення щодо витрати пари на камеру згоряння 16,6 кг/с, при цьому не зазначено, яке теплове джерело це забезпечує.

9. Як один з компонентів, що забезпечує функціонування камери згоряння газотурбодвигуна, у п. 5.1 розглянуто адіабатичний змішувач. При цьому не наведено, за допомогою чого в цьому компоненті забезпечується сталий температурний режим під час тривалої експлуатації теплового двигуна.

Зазначені зауваження мають переважно уточнюючий та дискусійний характер, тому не знижують високого рівня виконаного наукового дослідження та не впливають на його загальну високу оцінку.

Загальний висновок

Дисертація та наукові публікації здобувача мають достатній **науковий рівень**, забезпечують якісне розв'язання поставленого наукового завдання та свідчать, що здобувач володіє методологією наукової діяльності та здатний до самостійного виконання комплексних науково-прикладних завдань.

Дисертаційна робота **Шмаркова Олександра Андрійовича** «Ефективність камери згоряння газотурбінного агрегату контактного типу, що працює на водні» 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...» згідно з Постановою кабінету міністрів України № 507 від 03.05.2024 р.

Вважаю, що **Шмарков Олександр Андрійович** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 – енергетичне машинобудування (галузь знань 14 – електрична інженерія).

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри суднових енергетичних
установок Національного університету
«Одеська морська академія»
Міністерства освіти і науки України

 Сергій САГІН
15.07.2026

