

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Карпенко Артема Михайловича

на тему «Використання явища сепарації закрученого газового потоку за температурою для вдосконалення охолодження елементів ротора турбіни»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 14 Електрична інженерія
за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування

Актуальність теми дисертації.

Актуальність теми дисертації витікає з відомого факту щодо зростання ефективності газотурбінних двигунів від підвищення температури газового потоку перед турбіною. Однак підвищення температури газу перед турбіною одночасно призводить і до збільшення теплових навантажень на ключові складові частини ротора турбіни.

Подальший розвиток традиційних систем внутрішнього та плівкового охолодження лопаток турбіни обмежується складністю виготовлення внутрішніх каналів складної геометрії та зростанням пов'язаних із цим гідравлічних втрат.

Одним із багатообіцяльних підходів щодо можливості підвищення температури газу і відповідно ККД газотурбінних двигунів є попереднє зниження температури повітря, що використовується для охолодження робочих лопаток. При цьому необхідно враховувати той факт, що застосування звичайних теплообмінників у газотурбінних двигунах ускладнюється конструктивними, масо-габаритними та експлуатаційними чинниками, у зв'язку з чим увагу привертає можливість використання процесу температурної сепарації закрученого потоку (ефекту Ранка). Разом з тим відсутність загальноприйнятої теорії, що описує вихровий ефект Ранка, стримує його широке інженерне впровадження. Тому питання і задачі, які розглянуті в дисертації є вельми актуальними.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному: Уперше запропоновано спосіб попереднього закручування охолодного повітря перед подачею в канали робочих лопаток турбіни, що ґрунтується на використанні ефекту Ранка. Метод забезпечує примусове

розділення обертового потоку на гарячу й холодну фракції з подачею холодної частки повітря до лопаток, що підвищує ефективність їх охолодження.

Поглиблено уявлення про механізм радіальної температурної сепарації в закручених потоках. Аналітично й чисельно показано, що вирішальну роль відіграють відцентрові сили інерції, тоді як інші фактори мають другорядний вплив. Визначено ключові параметри, що визначають сепарацію, та обґрунтовано можливість її цілеспрямованої інтенсифікації шляхом конструктивного впливу на характеристики потоку.

Подальшого розвитку набуло розуміння природи динамічних газових сил, що діють на робочі лопатки турбіни. Встановлено, що ці сили зумовлені не лише параметрами потоку на виході із соплового апарата, а й відцентровими ефектами в криволінійному русі, які спричиняють енергетичну неоднорідність уздовж профілю лопатки. Урахування цього ефекту забезпечує точніше прогнозування динамічних навантажень.

Достовірність наукових результатів забезпечується використанням сучасних методів математичного моделювання, статистичної обробки експериментальних і виробничих даних, а також верифікацією результатів на основі реальних експлуатаційних показників. Проведено порівняння одержаних результатів з існуючими нормативами та даними аналогічних досліджень, що підтверджує їх обґрунтованість і практичну цінність.

Наукові дослідження були виконані здобувачем в АТ "Івченко-Прогрес" (м. Запоріжжя) при проєктуванні нових і модернізації існуючих турбін ГТД розробки підприємства, зокрема під час модернізації систем охолодження турбін двигунів AI-450TD, AI-450M, AI-450B, AI-450C-2, AI-450CP-2 під керівництвом доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України Кравченко Ігор Федорович.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання щодо підвищенні ефективності ГТД шляхом зниження температури охолодного повітря, що підводиться до робочих лопаток турбіни, за рахунок використання ефекту Ранка при вдосконаленні апарата супутнього закручування, виконано повністю. Здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності, сучасним CFD аналізом складних фізичних явищ, пов'язаних з температурною сепарацією та впровадив у виробництво отримані наукові результати.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Карпенко Артема Михайловича повністю відповідає спеціальності 142 Енергетичне машинобудування і є частиною наукових досліджень АТ «Івченко-Прогрес» у

рамках створення науково-технічного доробку, основною метою якого є підвищення ефективності та конкурентоспроможності вітчизняних силових установок для літальних апаратів, зокрема через пошук нових методів удосконалення систем охолодження газових турбін. Робота відповідає основним завданням «Державної цільової науково-технічної програми розвитку авіаційної промисловості на 2021–2030 роки», що затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 01 вересня 2021 р. № 951.

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, що підтверджує наявність особистого внеску здобувача у відповідний науковий напрям.

Аналіз звіту щодо текстових збігів за результатами перевірки дисертації свідчить про те, що робота Карпенко Артема Михайловича є самостійним дослідженням. Вона не містить ознак фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату чи неналежних запозичень. Усі використані ідеї, результати й фрагменти текстів інших авторів супроводжуються відповідними посиланнями на джерела.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертація виконана українською мовою, має чітку логічну побудову та зрозумілий виклад. Основний зміст подано у фаховому науково-технічному стилі з коректним використанням спеціалізованої термінології. Роботу достатньо ілюстровано рисунками й таблицями.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та додатків.

У вступі наведено обґрунтування актуальності теми дослідження та показано її відповідність сучасним науковим програмам і планам. Визначено мету роботи, сформульовано основні завдання, окреслено об'єкт і предмет дослідження, а також подано характеристику використаних методів. Представлено наукову новизну й практичну цінність одержаних результатів, висвітлено особистий внесок автора, наведено відомості про апробацію та публікації, а також описано структуру й обсяг дисертації.

Перший розділ містить аналітичний огляд наукових публікацій, присвячених розвитку систем охолодження газотурбінних двигунів та дослідженню ефекту Ранка. Проаналізовано еволюцію систем охолодження турбін ГТД і сучасні підходи до використання ефекту Ранка в цих системах, а також поточний стан проблеми підведення охолодного повітря до робочих лопаток.

Проведено критичний аналіз основних теоретичних концепцій ефекту Ранка, зокрема розглянуто явище енергетичної сепарації в закручених потоках,

принцип дії вихрової труби та зіставлено наявні теорії цього ефекту. Значну увагу приділено чисельним методам його моделювання: окреслено ключові труднощі CFD-аналізу течій у вихрових трубах і узагальнено сучасні результати комп'ютерного моделювання.

На підставі огляду обґрунтовано доцільність дисертаційного дослідження, спрямованого на підвищення ефективності ГТД шляхом зниження температури охолодного повітря, що подається до робочих лопаток турбіни, з використанням ефекту Ранка при вдосконаленні апарата супутнього закручування, та сформульовано основні завдання роботи.

Другий розділ присвячено обґрунтуванню методичних засад дослідження. У ньому викладено загальнонаукові та спеціалізовані методи, застосовані в роботі. Описано особливості створення та валідації CFD-моделі для аналізу температурної сепарації в закручених потоках рідини, представлено розрахункову методичку й використані експериментальні дані. Наведено результати дослідження сіткової збіжності та виконано порівняльний аналіз різних моделей турбулентності.

Зіставлення результатів чисельного моделювання з експериментальними даними в процесі валідації CFD-моделі дало змогу рекомендувати застосування стандартної моделі турбулентності $k-\varepsilon$ та неструктурованої тетраедральної обчислювальної сітки з призматичними шарами поблизу стінок у програмному середовищі Ansys CFX 2024 R2 для моделювання процесів енергетичної сепарації в обертових потоках рідини.

Третій розділ містить результати чисельного аналізу та дослідження ефекту Ранка. Для опису плоскопаралельного криволінійного руху газової частинки використано рівняння Лемба–Громеки, записані в криволінійній системі координат. У CFD-дослідженні застосовано модель каналу з кільцевим поперечним перерізом, утвореного двома співвісними поверхнями обертання з різними радіусами. Представлено результати чисельного моделювання та встановлено основні причини температурної сепарації обертового потоку за повною температурою. Проведено зіставлення отриманих результатів з даними інших авторів, що підтвердило висновки, зроблені на основі CFD-розрахунків і аналітичного аналізу рівнянь руху ідеальної рідини. Узгодженість результатів, здобутих різними методами, свідчить про їх надійність і обґрунтованість.

У четвертому розділі представлено результати застосування ефекту Ранка в системі подачі охолодного повітря до робочих лопаток турбіни газотурбінного двигуна. Проведено ґрунтовний аналіз конструкції малогабаритного турбовального двигуна з погляду можливості використання вихрового ефекту Ранка в системі охолодження лопаток. Окрему увагу приділено аналізу експлуатаційних чинників і обмежень, які впливають на процес температурної сепарації в умовах роботи двигуна. Розглянуто чотири

ключові технологічні та конструктивні фактори, що визначають ефективність реалізації ефекту Ранка в системі підведення охолодного повітря, при цьому підкреслено, що умови експлуатації двигуна накладають надзвичайно жорсткі обмеження на використання вихрових труб.

Подано опис розрахункової CFD-моделі, побудованої на основі осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса (RANS), яка була застосована для вдосконалення характеристик апарата супутнього закручування малогабаритного турбовального двигуна. Описано базову конструкцію системи підведення охолодного повітря до робочих лопаток турбіни та наведено результати її CFD-аналізу. Здійснено порівняльну оцінку базового й удосконаленого варіантів апарата супутнього закручування. Отримані результати показали, що зниження температури охолодного потоку на вході до каналів охолодження робочої лопатки на 4 К приводить до збільшення прогнозованого ресурсу лопатки приблизно на 9 %. На основі проведеного аналізу сформульовано обґрунтовані висновки, які підтверджують як принципову можливість, так і практичну доцільність застосування ефекту Ранка в системах підведення охолодного повітря до робочих лопаток турбін. Навіть за наявності значних геометричних обмежень малогабаритного двигуна отримано підтверджений чисельними розрахунками позитивний температурний ефект, що свідчить про перспективність подальшої оптимізації апаратів закручування та використання енергетичної сепарації потоку в двигунах більшого типорозміру.

П'ятий розділ присвячено дослідженню зв'язку між ефектом Ранка і термо та газодинамічними процесами, що відбуваються в проточних частинах газових турбін. Установлено взаємозалежність між різними формами енергетичної сепарації в турбінних течіях. Показано, що прояви ефекту Ранка узгоджуються зі зниженням повної температури в крайкових слідах, тангенціальною неоднорідністю потоку в міжлопаткових каналах і зміщенням температурних максимумів у периферійні зони проточної частини. Спільним чинником для цих явищ є закручений криволінійний рух потоку, за якого дія відцентрових сил призводить до температурної неоднорідності: зі збільшенням кривизни траєкторій і тангенціальної швидкості зростає градієнт повної температури.

За результатами нестационарних CFD-розрахунків також виявлено зв'язок між амплітудою нестационарних газових сил, що діють на робочі лопатки, та тангенціальним розподілом повної ентальпії в робочому колесі турбіни. Оскільки цей розподіл визначається геометрією міжлопаткового каналу та впливом відцентрових сил, зроблено висновок про опосередкований вплив ефекту Ранка на динамічні навантаження лопаток.

Показано, що ефект Ранка тісно пов'язаний з іншими явищами енергетичної сепарації в турбомашинах, зокрема ефектами Еккерта–Вайза, Керреброка–Миколайчика та периферійним зміщенням температурних максимумів у турбіні. Незважаючи на багатолітність аналогічних досліджень, роль вихрового ефекту Ранка в турбомашинних течіях досі залишається недостатньо висвітленою. Отримані результати підтверджують його вплив як на термодинамічні параметри потоку, так і на рівень динамічних навантажень, а також засвідчують доцільність урахування цього ефекту в подальших наукових дослідженнях і під час проєктних розрахунків газових турбін.

Загальні висновки висвітлюють основні отримані наукові результати, а також містять рекомендації щодо їх практичного застосування.

У додатках наведено список публікацій здобувача, акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційного дослідження оприлюднено у семи наукових публікаціях здобувача, з яких чотири статті опубліковано в наукових виданнях, що на момент публікації входили до переліку фахових видань України.

Крім того, основні положення та результати дисертації були представлені й обговорені на трьох наукових фахових конференціях.

Наукові праці Карпенка Артема Михайловича характеризуються високою якістю виконання, пройшли процедуру рецензування та перевірку на оригінальність відповідно до вимог конкретних видань. Особистий внесок здобувача є вагомим у кожній із опублікованих робіт. У публікаціях повно та послідовно висвітлено всі основні результати дисертаційного дослідження.

Отже, зміст дисертації у повному обсязі відображено в наукових публікаціях здобувача.

Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У дисертації (с. 90) зазначено, що валідацію розробленої CFD-моделі температурної сепарації виконано на основі експериментальних даних досліджень вихрової труби, проведених К. Dincer із колегами. Разом із тим геометрія вихрової труби, яка розглядалася в роботах К. Dincer, істотно відрізняється від геометрії системи підведення охолоджувального повітря до робочих лопаток турбіни. Така розбіжність у геометричних характеристиках може впливати на

коректність результатів CFD-моделювання і бути джерелом відхилень між розрахунковими та реальними значеннями температури охолодного повітря.

2. На сторінці 130 наведено рисунок 4.9, який містить схематичне зображення геометричних параметрів отворів для підведення охолодного повітря в апараті супутнього закручування. Водночас у тексті дисертації відсутнє пояснення щодо вибору кутових і лінійних розмірів каналів, показаних на рисунку 4.9. Доцільним було б доповнити роботу оптимізаційними дослідженнями, спрямованими на обґрунтований вибір цих параметрів.
3. У тексті дисертаційної роботи досить часто використовуються терміни «лінії струму» та «поверхні струму». У даному контексті більш коректним є застосування термінів «лінії течії» та відповідно «поверхні течії».
4. На сторінках 134–136 дисертації зазначено, що зменшення температури робочої лопатки турбіни на 4 К приводить до підвищення прогнозованого ресурсу її експлуатації на 9 %. Однак у роботі не наведено належного обґрунтування цього твердження.
5. У п'ятому розділі дисертації представлено результати серії стаціонарних і нестаціонарних CFD-розрахунків течії газу в каналах турбінних лопаткових профілів. Разом із тим інформація щодо валідації створеної CFD-моделі для розрахунку як стаціонарних, так і нестаціонарних процесів у таких каналах у роботі відсутня.

Загалом вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Карпенко Артема Михайловича на тему «Використання явища сепарації закрученого газового потоку за температурою для вдосконалення охолодження елементів ротора турбіни» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 Електрична інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6-9 «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 від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Карпенко Артем Михайлович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Офіційний опонент:

Завідувач кафедри турбінобудування
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»,
доктор технічних наук, с.н.с

Олександр УСАТИЙ

М.П.

«_17_» _травня_ 2026_ року