

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Михайлової Ірини Олександрівни** «**Розвиток методів розрахунку охолодження обертових елементів газових турбін**», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки»

Сучасний розвиток енергетики пов'язаний з постійним ростом споживання традиційних джерел енергії. За фактичними даними, обсяг виробництва електричної енергії електростанціями України, в 2017 р. склав 163,27 млрд. кВт·рік та за орієнтовними прогнозами в 2035 р. має збільшитися на 19,1 % та скласти 195 млрд. кВт·рік згідно даних «Нової енергетичної стратегії України до 2035 року». Основним напрямком підвищення економічності газових турбін є підвищення температури газу перед турбіною. В сучасних потужних енергетичних газотурбінних установках 350 МВт і більше, температура газу перед турбіною становить 1500-1600 °С, в серійних авіаційних газотурбінних двигунах (ГТД) – 1650-1750 °С і в наземних ГТД механічного приводу – 1350-1450 °С.

1. Актуальність обраної теми, її зв'язок з науковими державними й галузевими програмами.

Основними напрямками підвищення температури газу є використання жароміцних сплавів, керамічних матеріалів та систем охолодження відкритого і закритого типу. На сьогодні разом з використанням нових матеріалів перспективним напрямом підвищення температури газу є розвиток і удосконалення систем охолодження газових турбін.

Моделювання системи охолодження базується на мережевому методі. Система охолодження газових турбін представляє розгалужену гідравлічну систему з великою кількістю каналів різної геометрії, які регламентують витрати охолоджувача і впливають на економічність газотурбінної установки. При течії в придисковій порожнині або в порожнинах між двома дисками, при критичних і надкритичних значеннях тиску в каналах характер течії стає складним, а включення в гідравлічну мережу охолодження підшипника, де використовується в якості охолоджувача масло, ускладнює процес моделювання. Точність, з якою знаходяться витратні характеристики елементів схеми, є вирішальним фактором, що визначає надійність моделювання системи охолодження в цілому.

Подальше вдосконалення систем охолодження з різними видами обертових елементів газових турбін, вивчення структури і властивостей потоку, отримання залежностей, описуючих цей потік є актуальними для турбінобудування.

Свідченням актуальності розглянутої дисертаційної роботи є її виконання відповідно до фундаментальних держбюджетних НДР МОН України «Розвиток методів розрахунку охолодження роторів газових турбін та створення ефективної системи охолодження ротора високотемпературної газової турбіни» (ДР № 0113U000431), госпдоговірної НДР ДП «Івченко - Прогрес» (м. Запоріжжя) «Розробка методики розрахунку теплового стану деталей масляних порожнин опор роторів ГТД», в яких здобувач була виконавцем окремих етапів.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, основної частини з 4 розділів, висновків, списку використаних джерел з 125 найменувань на 16 сторінках та додатків. Матеріал викладено на 156 сторінках машинописного тексту, основного тексту – 132 сторінок, дисертаційна робота має 64 рисунків та 18 таблиць.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено її зв'язок з науково-дослідними роботами НТУ «ХП» МОН України, де виконувалась робота. Сформульовано мету й задачі дослідження. Вказано об'єкт, предмет та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено інформацію про публікації та апробацію викладеного в роботі матеріалу, а також відзначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі проведено огляд науково-технічної літератури щодо проектування систем охолодження ГТД, розглянуто міжнародний досвід експериментальних досліджень і обчислювальних експериментів про дослідження теплообміну і гідродинаміки течії в обертових елементах. Зроблено висновок про те що, основним напрямом розвитку ефективних і надійних систем охолодження ГТД є підвищення точності розрахунку витратних і гідравлічних характеристики елементів системи охолодження.

Відзначено, що на моделювання процесів впливає геометрія каналу, направлення течії (відцентрове, доцентрове), наявність супутніх потоків, параметри і властивості (повітря, масло-повітря) охолоджуючого середовища. Тому від точності, з якою буде з модельовано окремий елемент, залежить надійність моделювання всієї системи охолодження.

Показано, що в цей час для проектування систем охолодження газових турбін використовується кілька визнаних фахівцями комп'ютерних програм, серед яких і програма Thermal & Hydraulic Analysis (ТНА), яка розроблена д.т.н., проф. Тарасовим О.І.

У другому розділі наведено проведено адаптацію математичних моделей елементів гідравлічних мереж для розрахунку систем охолодження газових турбін, а саме апарату закручування потоку, теплообміннику, каналів, що переміщуються. Проведено дослідження впливу відцентрового ефекту на можливість подачі повітря в порожнини ротора турбіни.

Наведено опис, теоретичні основи моделювання елементів гідравлічної схеми, проведені чисельні дослідження по впливу апарата закрутки і теплообмінника на ефективність охолодження, складені відповідні моделі систем охолодження.

Системи охолодження роторів газових турбін містять канали охолодження, гідравлічний опір яких вивчено недостатньо. Це зумовило проведення CFD (Computational fluid dynamics) дослідження впливу швидкості супутніх потоків на коефіцієнт гідравлічного опору обертового каналу. Причому предметом аналізу був загальний коефіцієнт гідравлічного опору, коефіцієнти опору на вході і виході з каналу та по довжині каналу.

Побудована модель каналу у вигляді отвору, що з'єднують дві придискові камери, при цьому була можливість варіювати швидкістю переміщення отвору і ступенем закрутки потоку в камерах входу і виходу потоку повітря.

Проведено моделювання для забезпечення дійсної фізики процесу. При уточнених граничних умовах, що відповідають напрямку руху модельованого розвантажувального отвору, проведено розрахунки в діапазоні швидкостей від 20 м/с до 300 м/с.

Обробка експериментальних даних показала, що зі збільшенням швидкості потоку в перерізі різко зростає гідравлічний опір в приймальній порожнині; зміна опору цієї порожнини добре описується поліномом другого ступеня. У вихідному ж перерізі гідравлічний опір приймає спочатку невеликі позитивні значення, проте вже при відношенні швидкостей 1,5 опір стає рівним нулю, а при збільшенні до 2 - 2,5 рази - гідравлічний опір стає негативним.

В роботі розглянуті приклади течії повітря в порожнинах, утворених двома паралельними дисками з осью або радіальною подачею повітря на периферійному радіусі. Проведений CFD аналіз показав, що в залежності від напрямку подачі повітря істотно змінюється характер течії в порожнині. При радіальній подачі повітря в напрямку осі обертання має місце безвихровий характер перебігу, при осьовій - з'являється вихор, який обмежений середнім радіусом і зовнішнім радіусом порожнини. Проте, відмінність в характері течії майже не позначається на величині протитиску, який перешкоджає переміщенню повітря.

У третьому розділі розроблено узагальнений підхід до методу розрахунку коефіцієнтів витрати і гідравлічного опору елементів систем охолодження газових турбін, які регламентують витрату охолоджуючого повітря і забезпечують надійність і економічність системи охолодження. Обґрунтовано метод розрахунку витрати з урахуванням поправки на стисливість.

Проведено обґрунтування поправки на стисливість при розрахунках гідравлічних схем систем охолодження газових турбін. Відношення тиску $\frac{p_1^*}{p_2}$ рівне або більше критичного не приводить до замикання потоку в отворі, так як уздовж нього по потоку відбувається падіння повного тиску у вихідному перерізі каналу до величини, яка визначає критичне відношення тисків тоді для запирання витрати слід ввести додатковий коефіцієнт гідравлічного опору.

У четвертому розділі розроблено метод розрахунку повітряних систем охолодження і систем маслозабезпечення підшипників газових турбін. Метод розрахунку повітряних систем охолодження виявляється неповним, оскільки не включає підшипники газових турбін, у внутрішні камери яких надходить повітря, що перешкоджає потраплянню масла в порожнини ротора. Проведено спільний розрахунок повітряного і масляного охолодження всіх наявних елементів ротора.

При моделюванні особливу увагу приділено фізики процесу, так як в каналах системи охолодження може рухатися охолоджувач з різними властивостями, а саме: рідина (масло), газ (повітря) або маслоповітряна суміш. Якщо в каналі двофазна речовина, то властивості залежать не тільки від величини газівмісності, але і від орієнтації і геометричних характеристик каналів, по яких вона тече.

Деякі канали (порожнини) підшипника істотно відрізняються від каналів систем повітряного охолодження. За рахунок обертання і дроблення масла, краплі осідають на поверхні каналів і середовище вже не може розглядатися як гомогенне, тому накладалися

додаткові умови про концентрацію масла в деяких каналах, з урахуванням того, що загальна витрата масла в вихідних каналах не може бути більше припливу масла в вузол.

Розрахунок витрат масла і повітря в каналі підшипника виконувався в сполученій постановці, що дозволило отримати температурне поле підшипника, яке співвідноситься з експериментальним температурним полем підшипника газотурбінного двигуна Д-36 виробництва ДП «Івченко -Прогрес», незважаючи на наближеність завдання граничних умов і властивостей масла і матеріалів підшипника.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації базується:

- на аналізі літературних джерел по даній проблемі, на коректній постановці мети і задач дослідження,
- на використанні сучасних методів дослідження, програмних продуктів та математичного апарату,
- на широкому співставленні отриманих результатів з результатами інших дослідників та даними експериментів,
- на загальноприйнятих допущеннях і обмеженнях, що є досить правомірними та забезпечують повторювальність результатів з достатньою точністю,
- на правильному формулюванні отриманих висновків.

3. Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, наукова новизна результатів дослідження.

Достовірність отриманих наукових результатів роботи забезпечувалась коректним застосуванням математичного апарату для вирішення поставлених наукових задач та підтверджувалась узгодженням результатів розрахункових досліджень з результатами фізичних експериментів та досліджень інших авторів, виконаних за апробованими методиками. Теоретичні положення дисертації базуються на фундаментальних основах теорії теплообміну, гідродинаміки, чисельних методах вирішення задач теплопровідності, конвективного теплообміну, методах розрахунку розгалужених гідравлічних мереж, а саме на методі, заснованом на теорії графів; та на метод кінцевих елементів.

Достовірність отриманих результатів підтверджується визначенням діапазону достовірності результатів методу розрахунку насосного ефекту в придискових порожнинах роторів газових турбін, а саме: відношення ширини порожнини до зовнішньому радіусу диска не перевищує величину 0,17, що дозволяє обґрунтовано використовувати цей метод для розрахунків систем охолодження.

Узагальнений підхід до методу розрахунку коефіцієнтів витрати і гідравлічного опору елементів систем охолодження газових турбін (отвори, потовщені діафрагми, лабіринтові ущільнення) дозволив обґрунтувати поправку на стисливість до коефіцієнту гідравлічного опору подовжених діафрагм, отворів, лабіринтових ущільнень, яка уточнює коефіцієнт гідравлічного опору до 25%.

Наукова новизна отриманих результатів та висновків полягає в тому, що вперше визначено діапазон достовірності результатів методу розрахунку насосного ефекту в придискових порожнинах роторів газових турбін. Вперше доведено необхідність використання поправки на стисливість щодо коефіцієнта гідравлічного опору подовжених

діафрагм, отворів, лабіринтових ущільнень, яка уточнює коефіцієнт гідравлічного опору цих елементів до 25%. Вперше розроблено метод розрахунку гідравлічної мережі для маслоповітряної суміші, який розширює можливості моделювання процесів охолодження роторів і підшипників газових турбін та маслозабезпечення підшипників, що дозволяє проводити спільний розрахунок системи охолодження ротора турбіни і підшипників.

4. Рекомендації з використання та практична значимість отриманих результатів дослідження

Практична значимість отриманих результатів дослідження полягає в тому, що розроблено методи розрахунку повітряного охолодження та систем маслозабезпечення, які дозволяють отримати якісно нові результати, що сприяють підвищенню надійності проектування системи охолодження ГТУ та ГТД.

Сформульовані рекомендації щодо розрахунку систем охолодження газових турбін із застосуванням апарату закритки, теплообміннику, лабіринтових ущільнень, що дозволили коректніше виконувати розрахунки елементів газових турбін.

Запропоновані рекомендації, щодо застосування спільного методу розрахунку систем повітряного охолодження та маслозабезпечення роторів та підшипників, що дозволяють моделювати процеси охолодження роторів і підшипників газових турбін.

На основі розроблених методів створено розрахункові алгоритми, які впроваджені в програмний комплекс розрахунку системи охолодження та теплового стану газових турбін, та дозволяють проводити спільний розрахунок системи охолодження ротора турбіни і підшипників.

Результати дисертаційної роботи впроваджені: ДП «Івченко – Прогрес» (м. Запоріжжя), в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ «ХП» (м. Харків) при викладанні навчальної дисципліни «Системи охолодження газотурбінних установок» та дипломному проектуванні за спеціальністю «Енергетичне машинобудування».

5. Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях

В опублікованих працях здобувача достатньо повно викладені основні результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи. Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації.

Основні результати дисертації представлено у 8 друкованих роботах, з яких 5 статей у спеціалізованих фахових виданнях України, що входять до переліку рекомендованих МОН та міжнародних наукометричних баз даних, 3 тези доповідей на міжнародних конференціях.

Дисертація і автореферат написані відповідно до вимог до науково-технічним текстам. Автореферат і висновки повністю відповідають основному змісту роботи.

Основні теоретичні положення, результати та висновки наукового дослідження доповідались автором, обговорювались та отримали позитивну оцінку на Міжнародних науково-технічних конференціях «Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування» (м. Харків, 2014 – 2018 р.р.), «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2014, 2015р.р.), науковій конференції магістрантів та аспірантів НТУ «ХП» (м. Харків, 2018р.).

6. Дискусійні положення та зауваження по дисертаційній роботі і автореферату

1. При визначенні *Предмету дослідження* (охолодження обертових елементів газових турбін) доцільніше було б виділити підвищення ефективності охолодження обертових елементів газових турбін шляхом вдосконалення гідравлічних та теплових процесів у газовій турбіні.

2. У першому розділі на рисунку 1.1 -1.2 відсутні посилання на авторів схеми системи охолодження газової турбіни та принципів схем охолодження дисків роторів. Крім того, на рис.1.3 також не має посилань на авторів розрахункових досліджень впливу значення початкової закрутки потоку β_0 на розподіл температури. На рис. 1.4 необхідно вказати авторів вторинної повітряної системи охолодження. Аналогічні зауваження можна віднести до рис. 1.5-1.10. Рис.1.8. треба виконати українською мовою.

3. У другому розділі при визначенні впливу обертання на величину коефіцієнта гідравлічного опору отворів за повним абсолютним тиском (рис.2.6) бажано було позначити криві 1-5 пояснювальними підписами та роз'яснити розбіжності кривих 1-5 у разі однакових змінних (коефіцієнта гідравлічного опору від відношення швидкості).

4. У третьому розділі на рисунку 3.9 показано досить гарний збіг значень коефіцієнта витрати досвідчених даних М.Gritsch і ДП «Івченко-Прогрес» із запропонованим в роботі методом розрахунку. Однак, при малих значеннях відношення тисків має місце завищення розрахункових даних в порівнянні з експериментальними. Ймовірно в розрахунку не врахована зміна режиму течії при зменшенні швидкості течії. Це вимагає пояснення.

5. В третьому розділі при зіставленні розрахунку (суцільна лінія) коефіцієнту витрати по методу (3.16), (3.25), (3.28) зі експериментальними значеннями в досліджах М.Gritsch (ромби) і ДП «Івченко-Прогрес» (квадрати) на рис. 3.9 не зрозуміло про які методи (3.16), (3.25), (3.28) йдеться та як проводили порівняння даних? Яка точність цих порівнянь та чи можна результати вважати достовірними?

6. У четвертому розділі бажано було б більш докладніше пояснити результати розрахунку температурного стану підшипникового вузла двигуна Д36 (рис. 4.8) та вплив рівня температур на надійну роботу газотурбінного двигуна. Також не зрозуміло, яким чином розроблена методика може застосовуватися до підшипникових вузлів газотурбінних двигунів інших типів?

Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, яка є завершеним науково-практичним дослідженням. Зміст автореферату повністю відображає основні положення дисертації.


7. Висновок про відповідність дисертаційної роботи вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами)

В цілому можна констатувати, що рецензована робота є закінченим науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати, та по змісту відповідає паспорту спеціальності 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки. На базі узагальнення результатів теоретичних та розрахунково-експериментальних досліджень розв'язана науково прикладна задача вдосконалення систем охолодження газових турбін шляхом розвитку методів гідравлічного і теплового розрахунку каналів системи

охолодження газових турбін. Дисертаційна робота і автореферат оформлені з дотриманням вимог, встановлених МОН до дисертації.

Зважаючи на актуальність теми досліджень, ступінь обґрунтованості наукових результатів дисертаційної роботи, новизну та повноту викладу результатів в опублікованих працях автора, вважаю, що дисертація Михайлової Ірини Олександрівни «Розвиток методів розрахунку охолодження обертових елементів газових турбін» відповідає вимогам пп. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, що висувається до дисертації, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри теплоенергетичних
установок теплових та атомних електростанцій
Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

 О. Ю. Черноусенко

Підпис д.т.н., проф. Черноусенко О.Ю. засвідчую
Вчений секретар
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



 А.А. Мельниченко