

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

В теперішній час енергетичними установками, які мають саму високу економічність, є парові установки, до складу яких входять газотурбінні установки високої надійності, КПД яких залежить від температури газу перед турбіною. Це також відноситься і до газотурбінних двигунів для морського транспорту, авіації та інших галузей господарства. Підвищення температури газу перед турбіною залежить від створення жаростійких матеріалів та удосконалення систем охолодження високотемпературних елементів газових турбін.

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

В сучасних потужних енергетичних газотурбінних установках, потужність яких досягає 350 МВт, температура газу перед турбіною становить 1550-1650 °С, в серійних авіаційних газотурбінних двигунах – 1650-1750 °С, в газотурбінних двигунах транспортної системи та промислових підприємств – 1350-1450 °С. Оскільки створення нових жаростійких матеріалів – це довготривалий процес, то забезпечення ресурсу газових турбін (ГТ) та надійності роботи і, перш за все, високотемпературних турбін, може опиратися на більш ефективну систему охолодження високотемпературних елементів газової турбіни.

Розгалужена система охолодження вузлів і деталей ГТ є складною системою, створення сучасної розрахункової програми для її розрахунку є актуальною задачею.

Моделювання систем охолодження базується на мережевому методі, при використанні якого для знаходження параметрів охолоджуючого середовища використовується нестисливе робоче тіло та коефіцієнти гідравлічного опору а для кожного з елементів, з яких створюється система охолодження і формуються їх моделі.

Зараз для розрахунків систем охолодження використовується комплекс «ТНА» (Thermal & Hydraulic Analysis), розроблена О.І. Тарасовим і О.І. Долговим, до якого включені моделі основних елементів, з яких будуються системи охолодження. В той же час за останній період були розроблені нові підходи до покращення роботи системи охолодження. Наукова розробка таких підходів і доповнення діючого комплексу «ТНА» дозволить створювати більш досконалі газотурбінні установки і є актуальною задачею.

Свідченням актуальності розглянутої дисертаційної роботи є її виконання відповідно до комплексних науково-технічних робіт згідно з держбюджетною темою науково дослідних робіт МОН України «Розвиток методів розрахунку охолодження роторів газових турбін та створення ефективної системи охолодження ротора високотемпературної газової турбіни» (ДР№ 0113U000431), госпдоговірною НДР з ДП «Івченко-Прогрес» (м. Запоріжжя) «Розробка методики розрахунку теплового стану деталей масляних порожнин опор роторів ГТД», в яких дисертантом виконувались окремі етапи досліджень.

2. Ступень обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Дисертаційна робота Михайлової Ірини Олександрівни складається зі вступу, основної частини з 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел з 125 найменувань та 2-х додатків. Матеріал дисертаційної роботи викладено на 156 сторінках машинописного тексту, основного тексту – 132 сторінок, має 64 рисунки, 18 таблиць, 3 сторінки додатків та 16 сторінок списку використаних джерел.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної науково-дослідної роботи кафедри турбіно будування НТУ «ХП», де виконувалась робота та сформульовано мету і задачі дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено інформацію про публікації та апробацію викладеного у роботі матеріалу, відзначено особистий внесок дисертанта, а також відображено повноту викладення одержаних результатів у публікаціях та при апробації на конференціях.

У першому розділі проведено огляд публікацій, присвячених дослідженню нових сучасних підходів до роботи елементів систем охолодження високотемпературних газових турбін, проаналізовано ефективність їх використання та можливість створення моделей подібних елементів для розвитку програмного комплексу по створенню систем охолодження для сучасних ГТД. Відмічено основні напрямки науково-технічних досліджень в цьому напрямку, які базуються як на розрахункових методах з використанням CFD програм, так і на експериментальних дослідженнях, що дозволило виділити ряд актуальних задач детального дослідження, таких як: використання закручуючого апарату, впливу відцентрового та доцентрового руху охолоджуючого повітря, впливу його стисливості при роботі каналів різної форми, використання теплообмінників у системі охолодження, можливість включення в цю систему конструкції підшипникових вузлів та інше.

Аналіз публікацій щодо створення ефективних елементів та підходів до їх моделювання, що дозволяє розширити використання комплексу «ТНА», дозволив дисертанту сформулювати задачі для дослідження.

Водночас слід зауважити, що відмічена на сторінці 36 основна мета дисертаційної роботи «вдосконалення систем охолодження газових турбін шляхом подальшого розвитку мережевого методу розрахунку теплового стану газових турбін» є не досить коректною і декілька відрізняється від мети, яка витікає з назви дисертаційної роботи.

На думку опонента, в першому розділі дисертації (підрозділ 1.2) було би доцільно навести інформацію про основні елементи, що розглядаються в комплексі «ТНА» та методологічні підходи до її роботи з зазначенням на гідравлічний опір, як одну з головних характеристик мережевої системи.

Це дозволило би поліпшити розуміння доцільності вибору об'єктів дослідження, наведених у дисертації.

У другому розділі розглянута робота таких елементів як апарати закручування потоку (як лопаткові, так і похилими отворами), теплообмінник типу труба в трубі, канали охолодження різної довжини, що з'єднують камери подачі та прийому охолоджуючого повітря, а також досліджено вплив супутніх потоків та відцентрової течії на їх характеристики.

Побудовані моделі, що описують процеси, протікаючи в цих пристроях, та на основі використання CFD розрахунків одержані характеристики, що дозволяють їх використовувати при розрахунках систем охолодження газових турбін.

У розділі також розглянута система елементів роторів турбокомпресорів типу камер різної форми та різних місць підводу та відводу повітря, яке використовується в системі охолодження газової турбіни. Дослідження цих камер з використанням CFD програм дозволили адаптувати одержані результати до характеристик, що використовуються в діючих програмних комплексах для розрахунків систем охолодження газотурбінних двигунів.

До недоліків виконаних у розділу досліджень слід віднести відсутність інформації про вибрані CFD-моделі з зазначенням на розміри сітки, методу розрахунку та верифікації результатів розрахунків, а також використання розмірностей тиску, які не входять до системи СИ (бар замість МПа або кПа).

У третьому розділі розроблено узагальнений підхід до розрахунку коефіцієнтів гідравлічного опору за наявності коефіцієнтів витрати робочої середовища, враховуючи що при розрахунку мережних сітей використовуються саме коефіцієнти гідравлічного опору елементів при течії нестисливої рідини і є довідкові матеріали для багатьох елементів (довідник по гідравлічному опору І.Є. Ідельчика).

Розглянуто характеристики таких елементів як отвори в дисках, отвори в потовщених діафрагмах, лабіринтові ущільнення. При цьому обґрунтовано метод розрахунку витрати стисливого робочого середовища (повітря) з урахуванням поправки на стисливість.

При розрахунках гідравлічної системи використовується коефіцієнт гідравлічного опору кожної ділянки схеми, а експериментальні дані для таких ділянок, які включають елементи конструкції системи охолодження різної конфігурації, найчастіше представлені коефіцієнтами витрати робочого середовища, що стискується при відповідних відносних тисках перед і за елементом P_1^*/P_2 .

Розроблена І.О. Михайловою методика, яка базується на експериментальному дослідженні М. Gritsch та методі розрахунку витрат в отворах виконаних в подовжених діафрагмах (W. Mc Greehan) та розподілі коефіцієнтів на складові частини для входу, виходу з подовженого отвору та тертя на поверхні отвору дозволила одержати добрий збіг результатів розрахункового та експериментального досліджень.

Вплив зміни кута у двох напрямках було враховано додатковим множником у вигляді квадратичної залежності. При цьому в залежності значення кута прийнято не в градусах, а у вигляді тригонометричної функції не вказано діапазон його зміни.

Перевірка одержаної залежності для впливу кута нахилу отвору виконана на основі експериментальних даних наданих ДП «Івченко-Прогрес» підтвердила надійність використання запропонованого методу.

Для використання в якості основної характеристики для розрахунків систем охолодження «гідравлічного опору» виконано обґрунтування поправки на стисливість, яка була одержана на основі дослідження течії поза діафрагмою з тонкими кромками у широкому діапазоні зміни тисків перед і за нею.

Для цього було виконано розрахункове дослідження за допомогою CFD програми при моделі турбулентності k-ε та сіткою з чотирикутних елементів.

Аналіз одержаних результатів і їх зіставлення з різними підходами до визначення гідравлічного опору від відношення тисків P_1^*/P_2 показав, що в діапазоні відношення тисків від 1,0 до 2,4 вибрана дисертантом залежність дає надійне співпадіння з експериментом при використанні переходу $\xi \sim C_d$ (гідравлічний опір – витрата).

Як зауваження до розділу необхідно відмітити, що розташування похилих отворів можливе або на циліндричній, або конічній стінках і мало ймовірно для дисків, що обертаються, особливо при малих кутах нахилу. При опису направлення отворів (у тому числі і в розділі 1) не вказано від чого і в якому напрямку відраховуються кути.

В четвертому розділі представлено розроблений дисертантом метод розрахунку повітряних систем охолодження опорної конструкції підшипникових вузлів роторів газових турбін. Це дозволяє включити систему охолодження підшипників до загальної схеми охолодження газової турбіни.

Розглянута модель 2-х компонентного середовища – масляно-повітряна суміш – і її характеристики, допущення для побудови математичної моделі дозволили розглядати схему охолодження підшипникового вузла як гідравлічну систему для її включення в загальну систему охолодження газотурбінної установки.

Прийнята модель тепловиділення в підшипниках двох типів, котрі використовуються в авіаційних двигунах, розроблена в ЦІАМі дозволила побудувати граничні умови для картеру підшипникового вузла, а потім виконати розрахунок підшипникового вузла для газотурбінного двигуна ДЗ6 виробництва ДП «Івченко-Прогрес».

При аналізі теплового стану роликового підшипника і міст тепловиділення визиває питання розкладу температур у внутрішньому кільці та ролику (рис. 4.4) та направленість теплового потоку. В тексті підрозділу 4.4 відсутнє пояснення цього явища.

Прийняття для розрахунку коефіцієнта $\alpha = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ не досить обґрунтоване при балансі тепла, що виробляється у підшипнику.

Аналіз опанованої дисертаційної роботи показав, що ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації, базується

- на аналізі опублікованих 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 результатами експериментальних досліджень;
- на загальноприйнятих допущеннях при створенні математичних моделей, що є досить правомірним та забезпечує повторюваність результатів з достатньою точністю;
- на правильному формулюванні отриманих висновків.

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

Достовірність отриманих наукових результатів дисертаційної роботи І.О. Михайлової забезпечувалась коректним застосуванням математичного алгоритму для вирішення поставлених наукових задач, та підтверджувалась узгодженням результатів розрахункових досліджень з результатами фізичних експериментів, досліджень на натурному двигуні, та досліджень інших авторів, виконаних за апробованими методиками.

Достовірність ряду отриманих результатів підтверджується результатами зіставлення з результатами високоякісних експериментальних досліджень зарубіжних авторів.

Максимальне відхилення одержаних апроксимаційних залежностей для коефіцієнта гідравлічних витрат не перевищує 25% в діапазоні зміни відношення тисків P_1^*/P_2 від 1,0 до 2,4.

Наукова новизна отриманих результатів та висновки полягають у наступному.

Вперше запропоновано метод розрахунку гідравлічних мереж систем охолодження газових турбін таких, як апарат закручування потоку охолоджуючого повітря, теплообмінник, визначено ефективність охолодження при зміні кута виходу потоку та знайдено раціональне значення кута закрутки;

Вперше для течії в придискових порожнинах роторів газових турбін з урахуванням зміни переходу дисків за рахунок закручування потоку встановлено, що відношення ширини порожнини до зовнішнього радіусу диска не повинно перевищувати значення величини 0,17, при якій забезпечена достовірність результатів методу розрахунку коефіцієнту гідравлічних витрат, який використовується для розрахунку системи охолодження газової турбіни;

Вперше розроблено узагальнений підхід до методу розрахунку коефіцієнту гідравлічних витрат при знайденому, або відомому коефіцієнту витрати робочого середовища для теплових і нових елементів систем охолодження газових турбін, таких як отвори, отвори в потовщених діафрагмах, лабіринтові ущільнення та інші. Обґрунтовано введення поправки на стисливість при знаходженні коефіцієнтів гідравлічного опору для елементів систем охолодження дозволяє значно знизити похибку, яка не перевищує 25 % при визначенні коефіцієнту гідравлічного опору.

Вперше розроблена математична модель розрахунку термодинамічних і гідравлічних характеристик підшипникового вузла газотурбінних установок, що дозволило включити його в систему охолодження газової турбіни з урахуванням характеристик двокомпонентної маслоповітряної суміші.

На основі чисельних досліджень набула подальшого розвитку методика проектування окремих важливих для забезпечення надійної роботи газотурбінного двигуна елементів систем охолодження, які були запропоновані за останній час.

4. Рекомендації з використання та практична значимість отриманих результатів дослідження

Практична значимість отриманих результатів дослідження полягає в тому, що підвищується ефективність роботи системи охолодження газотурбінних установок та підвищується надійність їх роботи.

Використання розробок, приведених в дисертаційній роботі І. О. Михайлової для газотурбінного двигуна ДЗ6 виробництва ДП «Івченко-Прогрес» підтверджує її практичну значимість (акт про впровадження ДП «Івченко-Прогрес»).

Науково-практичне значення виконаних досліджень також підтверджується використанням в учбовому процесі одержаних результатів (акт впровадження від 18.03.2018 року).

5. Повнота викладення матеріалів дисертації в опублікованих працях

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

Основні результати дисертації представлено у 8-ми друкованих роботах, з яких 5 статей у спеціалізованих фахових виданнях України, що входять до переліку МОН та міжнародну реферативну базу. 3 роботи – матеріали міжнародних конференцій.

Дисертація і автореферат написані відповідно до вимог до науково-технічних текстів.

Автореферат і висновки повністю відповідають основному змісту роботи.

Основні теоретичні положення, результати та висновки науково-практичного дослідження доповідались дисертантом, обговорювались на наукових семінарах на Міжнародних конференціях «Енергетичні науково-технічні та теплотехнічні процеси та устаткування» (м. Харків, 2014-2018 р.), «Інформаційні технологія, наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2014, 2015 р.) та на Міжнародній науково-практичній конференціях магістрантів та аспірантів «Електротехніка та електромеханіка, радіотехніка та енергетичне машинобудування» НТУ ХПІ (м. Харків, 2018р).

6. Дискусійні положення та зауваження по дисертаційній роботі і автореферату

Не дивлячись на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи І. О. Михайлової, вважаю необхідним зробити наступні зауваження.

1. При аналізі опублікованих робіт та їх розгляді для багатьох публікацій визначено тільки те, що в них наведено і не дана критична оцінка, з якої повинні виходити задачі для розробки теми дисертації.

2. Дисертантом допущені недостатньо точні формулювання, як , наприклад, «закон перетворення» замість «закон збереження» (стор. 25), на рис. 1.9 наведено останній ступінь газової турбіни, а в опису вона визначена як ступінь компресора, не проаналізовано розподіл температур на поверхні елементів опори.

3. У розділі 2 математична модель системи охолодження (підрозділ 2.3) наведена у дуже спрощеній формі, яку можна розглядати для окремого елемента типу каналу з однаковим коефіцієнтом тепловіддачі в одномірній постановці без оцінки можливого впливу сусідніх елементів та необхідності врахування просторової течії у розташованих поруч елементах.

4. Чисельні дослідження течії та гідравлічного опору в каналах, що переміщуються, розглянуто при одній компоненті швидкості, що обмежує використання одержаних результатів для каналів в дисках, які обертаються, конструкцією «диск-дефлектор».

5. Використання моделі турбулентності $k-\epsilon$ для чисельних розрахунків потребує верифікації одержаних результатів. Для підвищення достовірності одержаних результатів було би доцільно розглянути декілька моделей турбулентності, як-то $k-\omega$, алгебраїчної, дослідженої В.М. Капіносом та інших.

6. Ствердження про відсутність надійного розрахунку відцентрового тиску в порожнинах роторів (стор. 60) при їх обертанні потребує провести аналіз розрахункових методів, наведених у докторській дисертації В.М. Капіноса та експериментальних досліджень його учнів – Нікітенко М., Пустовалова В.М., Рудько О.П., виконаних на кафедрі тубінобудування.

7. Цікаві результати врахування в системі охолодження теплообмінників на жаль розглянуті тільки для одного типу – «труба в трубі». Було би доцільно, крім розширення їх конструктивних типів, визначити, в яких умовах і яких двигунах можливо використовувати теплообмінники, чи можливо їх використовувати для систем маслозабезпечення газотурбінних двигунів.

8. В розділі 3 відсутня обґрунтованість для широкого аналізу, особливо для врахування стисливості, вибір лабіринтового ущільнення прямого типу.

9. У розділі 4 дисертантом для підшипникових вузлів масляно-повітряна суміш термінологічно представляється як двофазна, не дивлячись на те, що в розділі 1 при аналізі публікацій по тепловому стану підшипникових вузлів вона названа правильно – двокомпонентна.

10. З точки зору опонента при розгляді системи охолодження підшипникових вузлів слід розділити розгляд на дві задачі:

- тепловий стан підшипника, яку в значному обсязі не доцільно розглядати, а тільки використовувати експериментальні залежності ЦІАМ для оцінки тепловиділення;
- теплообмін в картері підшипника і опорі для знаходження характеристик, необхідних при розрахунках системи охолодження.

11. Також слід відмітити, що в тексті дисертаційної роботи є окремі неточності в означеннях і формулюваннях.

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

7. Загальний висновок по роботі

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 створено науково-методичний апарат для вирішення науково-прикладної проблеми розвитку методів розрахунку систем охолодження газових турбін. Дисертаційна робота і автореферат оформлені з дотриманням вимог, встановлених МОН України до дисертацій.

Зважаючи на актуальність теми досліджень, ступень обґрунтованості наукових результатів дисертаційної роботи, новизну та повноту викладення результатів в опублікованих працях дисертанта, вважаю що дисертація Михайлової Ірини Олександрівни на тему «Розвиток методів розрахунку охолодження обертових елементів газових турбін» відповідає вимогам пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, до кандидатських дисертацій, а її автор Михайлова Ірина Олександрівна заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

Офіційний опонент

Старший науковий співробітник
відділу моделювання та ідентифікації
Інституту проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України
кандидат технічних наук, с.н.с.

В. М. Голощатов

Підпис к.т.н., с.н.с. Голощатова В.М.
засвідчую.

Зам. директора з наукової роботи
ІПМаш НАН України
д.т.н., чл.-кор. НАН України



А. О. Костіков