

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Михайлова Ірина Олександрівна

УДК 621.438

ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗВИТОК МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ОХОЛОДЖЕННЯ
ОБЕРТОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОВИХ ТУРБІН

Спеціальність 05.05.16 - турбомашини та турбоустановки
14 – електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ І. О. Михайлова

Науковий керівник Тарасов Олександр Іванович, доктор технічних наук,
професор

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Михайлова І. О. Розвиток методів розрахунку охолодження обертових елементів газових турбін. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.16 «Турбомашини та турбоустановки», (технічні науки).– Національний технічний університету «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2018.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-технічної задачі вдосконалення систем охолодження газових турбін шляхом подальшого розвитку методів гідравлічного і теплового розрахунку каналів системи охолодження газових турбін. Вивченню структури і властивості потоку в цих елементах, отриманню залежностей, описуючих цей потік.

Виконано аналіз науково-технічної літератури, присвяченій проектуванню систем охолодження ГТД, в якому розглянуто міжнародний досвід експериментальних досліджень і обчислювальних експериментів, що до дослідження теплообміну і гідродинаміки течії в обертових елементах. В результаті аналізу літератури показано що, основним напрямом розвитку ефективних і надійних систем охолодження ГТД є підвищення точності розрахунку витратних і гідравлічних характеристик елементів системи охолодження.

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

Проведено адаптацію математичних моделей елементів гідравлічних мереж для розрахунку систем охолодження газових турбін, таких як: апарат закручування потоку (АЗ), теплообмінник, канали, що переміщуються.

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

Встановлено, що ефективність охолодження при застосуванні АЗ збільшується на 15%.

Запропоновано підхід включення в загальну гідравлічну схему теплообмінника, при загальному наборі початкових даних, які відображають роботу теплообмінника в змінному режимі.

Проведено дослідження впливу відцентрового ефекту на можливість подачі повітря в порожнини ротора турбіни. Розглянуті приклади течії повітря в порожнинах, утворених двома паралельними дисками з осьовою 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 течії, при осьовій - з'являється вихор. Проте, відмінність в характері течії майже не позначається на величині протитиску, який перешкоджає переміщенню повітря.

Визначено діапазон достовірності результатів методу розрахунку насосного ефекту в придискових порожнинах роторів газових турбін, а саме: відношення ширини порожнини до зовнішнього радіуса диска не перевищує величину 0,17, що дозволяє обґрунтовано використовувати цей метод для розрахунків систем охолодження.

Розроблено узагальнений підхід до методу розрахунку коефіцієнтів витрати і гідравлічного опору елементів систем охолодження газових турбін таких, як отвори, потовщені діафрагми, лабіринтові ущільнення, які регламентують витрату охолоджуючого повітря і відповідають за надійність і економічність системи охолодження.

Так як розрахунок гідравлічної схеми застосовує коефіцієнти гідравлічного опору кожної ділянки схеми, а експериментальні дані часто представлені коефіцієнтами витрати, тому встановлено зв'язок між ними за допомогою припущень, які враховують різницю між стисливим і нестисливим середовищами.

На основі проведених досліджень, обґрунтовано поправку на стисливість до коефіцієнту гідравлічного опору подовжених діафрагм, отворів, лабіринтових ущільнень, яка уточнює коефіцієнт гідравлічного опору до 25%.

Розроблено математичну модель розрахунку підшипника, описані підходи до визначення концентрації і термодинамічних характеристик двофазного гомогенного середовища, що дозволило включити підшипник як в гідравлічну, так і теплову моделі систем охолодження газових турбін.

Розроблено метод розрахунку гідравлічної мережі для маслоповітряної суміші, який істотно розширив можливості моделювання процесів охолодження роторів і підшипників газових турбін і маслозабезпечення підшипників, що дозволило провести спільний розрахунок системи охолодження ротора турбіни і підшипників.

Проведено дослідження системи охолодження ротора високотемпературної газової турбіни за допомогою розроблених методів розрахунку. Встановлено, що методи розрахунку відповідають робочим даним газотурбінного двигуна Д 36.

Ключові слова: газова турбіна, система охолодження, гідравлічний опір, витрата повітря, підшипник, система маслозабезпечення.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Михайлова И. А., Задачи проектирования систем парового охлаждения газовых турбин / А.И. Тарасов, О.А. Литвиненко, И.А. Михайлова // Вестник НТУ «ХПИ». Серія Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – №12. – С. 42-48.

2. Михайлова И. А., Комплексный метод расчёта систем охлаждения роторов газовых турбин / А.И. Тарасов, Чан Конг Шанг, О.А. Литвиненко, И.А. Михайлова // Вестник НТУ «ХПИ». Серія Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2015. – № 15 – С. 63-68.

3. Михайлова И. А., Анализ метода расчета противодавления в тракте подачи воздуха из компрессора в ротор газовой турбины / А.И. Тарасов, О.А. Литвиненко, И.А. Михайлова // Вестник НТУ «ХПИ». Серія Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2016. – №8. – С. 54-59.

4. Михайлова И. А., Расходные характеристики отверстий, применяемых в системах охлаждения газовых турбин / А.И. Тарасов, О.А. Литвиненко, И.А. Михайлова // Вестник НТУ «ХПИ». Серія Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2017. – №10. – С. 52-58.

5. Михайлова И. А., Обоснование метода учета сжимаемости потока при течении в диафрагмах с острыми кромками / А.И. Тарасов, О.А. Литвиненко, И.А. Михайлова // Вестник НТУ «ХПИ». Серія Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2018. – №13. – С. 9-14.

6. Михайлова І.О., Повышение точности расчетов систем охлаждения газовых турбин / О.І. Тарасов, О.О Литвиненко., І.О. Михайлова, О.І. Долгов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези

доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.I (21-23 травня 2014 р., Харків) / за ред. проф. Товажнянського Л.Л. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 302

7. Михайлова І.О., Про взаємодію потоків газу і повітря на ділянці трактового ущільнення газової турбіни / О.І. Тарасов, О.О Литвиненко., І.О. Михайлова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.I (20-22 травня 2015 р., Харків) / за ред. проф. Товажнянського Л.Л. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 296

8. Михайлова І. О., Дослідження теплового стану роторних і статорних елементів турбіни / Михайлова І. О., Бритвенко В. О. // Електротехніка та електромеханіка, радіотехніка та енергетичне машинобудування: Тези доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів (17–20 квітня 2018 року): матеріали конференції: у 3-х ч. – Ч. 2 / за ред. проф. Є.І. Сокола. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – С. 29

ABSTRACT

Mykhaylova I. O. Development of methods for calculating the cooling of rotating elements of gas turbines. – The qualification scientific work on the manuscript.

The dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Ph. D.) in the specialty 05.05.16 «Turbomachine and turbine plants», (technical sciences). National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Ministry of Science and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

Dissertation is devoted to solving an important scientific and technical task of improving the cooling systems of gas turbines by further developing the

methods of hydraulic and thermal calculation of the channels of the cooling system of gas turbines. To study the structure and flow properties of these elements, to obtain the dependences describing this flow.

The analysis of scientific and technical literature devoted to the design of cooling systems for gas turbine engines was carried out, in which international experience of experimental studies and computational experiments was considered, to the study of heat transfer and flow hydrodynamics in rotating elements. As a result of the analysis of the literature, it is shown that the main direction of development of efficient and reliable GTE cooling systems is to improve the accuracy of the calculation of the flow and hydraulic characteristics of the elements of the cooling system.

It is shown that the modeling of processes is influenced by the channel geometry, flow direction (centrifugal, centripetal), presence of associated flows, parameters and properties (air, oil-air) of the cooling medium. Therefore, the accuracy with which the simulation of the entire cooling system depends on the accuracy with which the individual element will be modeled.

Mathematical models of hydraulic network elements have been adapted to calculate gas turbine cooling systems, such as: a device for swirling flow, a heat exchanger, channels that are moved.

Description, theoretical bases of modeling of these elements of a hydraulic circuit, the researches carried out on the influence of the apparatus of the twist and the heat exchange apparatus on the efficiency of cooling are given, the corresponding models of cooling systems are made.

Impact study conducted of the centrifugal effect on the possibility of air supply in the cavity of the rotor of the turbine has been studied. The considered examples of air flow in cavities formed by two parallel disks with axial or radial air supply at a peripheral radius.

CFD analysis showed that, depending on the direction of air supply, the nature of the flow in the cavity is significantly changed. At radial air supply in the direction of the axis of rotation there is a non-vortex nature of the flow, with axial -vortex occurs. However, the difference in the nature of the flow almost does not affect the magnitude of the back pressure, which impedes the movement of air.

The range of reliability of the results of the calculation method of the pump effect in the disk cavities of the rotors of the gas turbines is determined, namely: the ratio of the width of the cavity to the external radius of the disk does not exceed the value of 0.17, which allows us to use this method reasonably for calculations of the cooling systems.

Developed a generalized approach to the method of calculating the flow coefficients and the hydraulic resistance of elements of the cooling systems of gas turbines such as openings, thickened diaphragms, labyrinth seals, regulating the flow of cooling air, which are responsible for the reliability and economy of the cooling system.

In the calculations of the hydraulic circuit, the hydraulic resistance coefficients of each section of the circuit are used, and the experimental data are often represented by flow coefficients. Therefore, a connection is established between them using assumptions that take into account the difference between compressible and incompressible media.

On the basis of the research, justified correction for compressibility to the coefficient of hydraulic resistance of elongated diaphragms, holes, labyrinth seals, which specifies the coefficient of hydraulic resistance to 25%.

A mathematical model for calculating the bearing has been developed, approaches have been described for determining the concentration and thermodynamic characteristics of a two-phase homogeneous medium, which made it possible to include the bearing in both the hydraulic and thermal models of gas turbine cooling systems.

A method was developed for calculating the hydraulic network for the air-oil mixture, which significantly expanded the possibilities for simulating the cooling processes of the rotors and bearings of gas turbines and providing bearings with oil, which made it possible to jointly calculate the cooling system of the turbine rotor and bearings.

A study of the cooling system of the rotor of a high-temperature gas turbine was carried out using the developed calculation methods. It is established that the calculation methods correspond to the working data of the D-36 gas turbine engine.

Key words: gas turbine, cooling system, hydraulic resistance, air flow, bearing, oil-freezing system.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT:

1. Mihaylova I. A., Zadachi proektirovaniya sistem parovogo ohlazhdeniya gazovyih turbin / A.I. Tarasov, O.A. Litvinenko, I.A. Mihaylova // Vestnik NTU «HPI». Seriya Energetichni ta teplotehnichni protsesi y ustatkuvannya.– 2014. – №12. – S. 42-48.

2. Mihaylova I. A., Kompleksnyiy metod raschyota sistem ohlazhdeniya rotorov gazovyih turbin / A.I. Tarasov, Chan Kong Shang, O.A. Litvinenko, I.A. Mihaylova // Vestnik NTU «HPI». Seriya Energetichni ta teplotehnichni protsesi y ustatkuvannya.– 2015. – № 15 – S. 63-68.

3. Mihaylova I. A., Analiz metoda rascheta protivodavleniya v trakte podachi vozduha iz kompressora v rotor gazovoy turbinyi / A.I. Tarasov, O.A. Litvinenko, I.A. Mihaylova // Vestnik NTU «HPI». Seriya Energetichni ta teplotehnichni protsesi y ustatkuvannya. – 2016. – №8. – S. 54-59.

4. Mihaylova I. A., Rashodnyie harakteristiki otverstiy, primenyaemyih v sistemah ohlazhdeniya gazovyih turbin / A.I. Tarasov, O.A. Litvinenko, I.A.

Mihaylova // Vestnik NTU «HPI». Seriya Energetichni ta teplotehnichni protsesi y ustatkuvannya.– 2017.– №10. – S. 52-58.

5. Mihaylova I. A., Obosnovanie metoda ucheta szhimaemosti potoka pri techenii v diafragmah s ostrymi kromkami / A.I. Tarasov, O.A. Litvinenko, I.A. Mihaylova // Vestnik NTU «HPI». Seriya Energetichni ta teplotehnichni protsesi y ustatkuvannya.– 2018. – №13. – S. 9-14.

6. Mihaylova I. A., Povyishenie tochnosti raschetov sistem ohlazhdeniya gazovyih turbin / A.I. Tarasov, O.A. Litvinenko, I.A. Mihaylova, O.I. Dolgov // Informatsiyi tehnologii: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: Tezi dopovidey XXII mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsyyi, Ch.I (21-23 travnya 2014 r., Harkiv) / za red. prof. Tovazhnyanskogo L.L. – Harkiv, NTU «HPI».– S. 302

7. Mihaylova I. A., Pro vzaEmodiyu potokiv gazu i povitrya na dilyantsi traktovogo uschilnennya gazovoyi turbini / O.I. Tarasov, O.O Litvinenko., I.O. Mihaylova // Informatsiyi tehnologii: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: Tezi dopovidey XXIII mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi, Ch.I (20-22 travnya 2015 r., Harkiv) / za red. prof. Tovazhnyanskogo L.L. – Harkiv, NTU «HPI».– S. 296

8. Mihaylova I. A., Doslidzhennya teplovogo stanu rotnih i statornih elementiv turbini / Mihaylova I. O., Britvenko V. O. // Elektrotehnika ta elektromehanika, radiotehnika ta energetichne mashinobuduvannya: Tezi dopovIdey XII mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiui magistraytiv ta aspirantiv (17–20 kvItnya 2018 roku): materiali konferentsiyi: u 3-h ch. – ch.2 / za red. prof. E.I. Sokola. – Harkiv : NTU «HPI», 2018. – S.29

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 Аналіз літературних джерел і постановка задачі дослідження	13
1.1 Основні вимоги до проектування систем охолодження газових турбін	13
1.2 Аналіз робіт з дослідження теплообміну і гідродинамічних характеристик течії охолоджувача в обертових елементах ГТД	16
1.2.1 Вплив на термодинамічні характеристики напрямку та закручування потоку в міждисккових порожнинах	16
1.2.2 Підходи до визначення витратних характеристик вторинної течії	23
1.2.3 Моделювання гідравлічних систем при двокомпонентному гомогенному середовищі	27
1.3 Постановка задачі дослідження	33
РОЗДІЛ 2 Адаптація математичних моделей елементів гідравлічних мереж для розрахунку систем охолодження газових турбін	36
2.1 Застосування апарату закрутки для зниження температури повітря при охолодженні ротора	36
2.2 Математична модель системи охолодження	37
2.3 Моделювання апарату закрутки	38
2.4 Зміна ентальпії і температури повітря в каналах охолодження за рахунок зміни швидкості обертання	43
2.5 Розрахунок підігріву повітря в каналах охолодження з урахуванням роботи ротора	45
2.6 Застосування апарату закрутки для зниження температури повітря на вході в канали охолодження робочої лопатки	47

2.7	Чисельне дослідження течії та гідравлічного опору в каналах, що переміщуються	50
2.8	Вплив відцентрового ефекту на можливість подачі повітря в порожнини ротора турбіни	57
2.9	Наближений метод визначення протитиску в порожнині ротора при доцентровому русі повітря	59
2.9.1	Основні положення	59
2.9.2	Аналіз наближеного методу	62
2.10	Введення в систему охолодження газових турбін каналу типу «теплообмінник».	68
2.10.1	Загальна характеристика теплообмінника.	68
2.10.2	Дослідження ефективності теплообмінника	70
2.10.3	Падіння тиску в гарячій лінії.	74
2.10.4	Температура і падіння тиску в гарячій лінії	76
2.10.5	Приклад дослідження	76
2.11	Висновки по розділу 2	79
РОЗДІЛ 3 Розробка методу розрахунку коефіцієнтів витрати і гідравлічного опору отворів систем охолодження газових турбін		80
3.1	Витратні характеристики отворів, які застосовуються в системах охолодження газових турбін	80
3.1.1	Гідравлічний опір і коефіцієнт витрати	80
3.1.2	Експериментальні дані	83
3.1.3	Метод визначення коефіцієнта витрати	83
3.1.4	Метод визначення гідравлічного опору в стисливому середовищі	86
3.1.5	Порівняння методів розрахунку C_d з експериментом і розробка методу розрахунку гідравлічного опору нахиленого отвору.	89
3.1.6	Аналіз проведення експерименту.	91

3.2	Обґрунтування поправки на стисливість при розрахунках гідравлічних схем систем охолодження газових турбін	94
3.2.1	Гідравлічний опір і коефіцієнт витрати	94
3.2.2	CFD обґрунтування зроблених припущень	97
3.2.3	Розрахунок течії через діафрагму в ТНА	101
3.2.4	Розрахунок коефіцієнта гідравлічного опору прямоочних лабіринтових ущільнень	103
3.2.5	Визначення коефіцієнта витрати по РТМ	105
3.2.6	CFD обґрунтування введення поправки на стисливість	109
3.3	Висновки по розділу 3	113
РОЗДІЛ 4 Узагальнений метод розрахунку повітряних систем охолодження і систем маслозабезпечення підшипників газових турбін		114
4.1	Дослідження проблем змащування і охолодження підшипників ГТД	114
4.2	Постановка задачі дослідження	115
4.3	Розробка методу розрахунку повітряних систем охолодження і систем маслозабезпечення підшипників газових турбін	117
4.4	Розрахунок тепловиділення в підшипниках	123
4.5	Тепловіддача на стінках корпусу підшипників	126
4.6	Розрахунок системи охолодження підшипників ТНТ і ТВТ двигуна Д 36	127
4.7	Висновки по розділу 4	130
ВИСНОВКИ		131
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		133
ДОДАТКИ		151
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ		155