

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Литвиненко Оксана Олексіївна

УДК 621.438:621.45.038.3

**УДОСКОНАЛЮВАННЯ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ
ЛОПАТОК ГАЗОВИХ ТУРБІН НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ
РІДИННОМЕТАЛЕВИХ ТЕПЛОНОСІЇВ**

Спеціальність 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки

Автореферат
дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі турбінобудування Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти та науки України

Науковий керівник:

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,
Тарасов Олександр Іванович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
м. Харків,
доцент кафедри турбінобудування

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Переверзєв Дмитро Андрійович**, Інститут проблем машинобудування ім. А.Н. Подгорного НАН України, м. Харків, ведучий науковий співробітник відділу оптимізації процесів та конструкцій турбін;

- кандидат технічних наук **Крикунов Дмитро Вікторович**, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", м. Харків, доцент кафедри конструкцій авіаційних двигунів.

Провідна установа – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ

Захист відбудеться 27 січня 2005 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 17 грудня 2004 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук

Потетенко О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час важливим напрямком у розвитку енергетичного газотурбінобудування є створення агрегатів великої одиничної потужності, а також включення їх до складу парогазових установок. У зв'язку з постійним ростом цін на енергоносії, велику увагу приділяється економічності як стаціонарних, так і транспортних газотурбінних установок. Важливого значення набувають питання забезпечення надійної роботи енергетичного устаткування.

Задачі удосконалювання стаціонарних і транспортних газотурбінних установок і газотурбінних двигунів усіх типів вирішуються шляхом освоєння усе більш високих температур газу. Оскільки темпи підвищення жароміцності сплавів для газових турбін істотно відстають від росту температур газу, єдиним реальним шляхом підвищення температур газу в найближчому майбутньому залишається застосування охолодження найбільш нагрітих і найбільш навантажених деталей газових турбін, у першу чергу соплових і робочих лопаток. Тому дослідження і розробка проблем освоєння високих температур газу в газотурбінних установках за допомогою застосування високоефективного охолодження деталей турбін є одним з найбільш актуальних напрямків розвитку сучасного газотурбінобудування.

Вітчизняні, а також закордонні організації і фірми накопили великий досвід у розробці методів розрахунку зовнішнього і внутрішнього теплообміну в елементах охолоджуваних турбін, аеродинаміки турбін і охолодних трактів; у створенні методів розрахунку термонапруженого стану охолоджуваних лопаток і в оцінці їхньої міцності; в удосконалюванні конструкцій елементів повітряних конвективних, плівкових, пористих і комбінованих систем охолодження; у розробці нових рідинних систем охолодження. Однак, у даний час є актуальним створення нових, більш ефективних способів охолодження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, виконані в дисертаційній роботі були зв'язані з науково - дослідними роботами, які виконувались на кафедрі турбінобудування НТУ „ХПІ” за планом Міністерства освіти і науки України: темою М2829 (№ державної реєстрації 0100U001660) – “Створення методів розрахунку гідродинаміки і теплообміну високотемпературних теплових труб. Використання теплових труб для теплової стабілізації елементів конструкцій газотурбінних установок” (наказ ХДПУ № 6-П від 4.01.2000) за науковим напрямком 3. Енергетика 3.1. Енергетика та природні ресурси.

Роль здобувача у виконанні зазначеної науково-дослідної роботи полягала в моделюванні теплового стану багатошарової системи, що складає з оболонки лопатки, зовнішня поверхня якої нагрівається газом, пористого середовища, заповненого рідиннометалевим теплоносієм і

внутрішньої охолоджуваної повітрям ізолюючої тонкої стінки; обґрунтуванні можливості застосування пористих вставок з рідиннометалевим теплоносієм для вирівнювання температурного поля оболонки і збільшення ефективності її охолодження.

Мета і задачі дослідження. Основною метою дисертаційної роботи є створення методу проектування альтернативного засобу охолодження і розробка конструкції охолоджуваних лопаток газових турбін з використанням елементів теплових труб - пористих елементів, насичених рідиннометалевим теплоносієм для вирівнювання температурного поля у місцях найбільш різких змін граничних умов. Використання пористого елемента пропонується поряд з використанням повітряної системи охолодження.

У процесі дослідження були поставлені такі задачі:

а) моделювання процесів руху і фазового переходу в пористому середовищі, заповненому рідиннометалевим теплоносієм;

б) моделювання теплового стану багат шарової системи, що складає з оболонки лопатки, зовнішня поверхня якої нагрівається газом, пористого середовища, заповненого рідиннометалевим теплоносієм і внутрішньої охолоджуваної повітрям ізолюючої тонкої стінки;

в) обґрунтування можливості застосування пористих вставок з рідиннометалевим теплоносієм для вирівнювання температурного поля оболонки і збільшення ефективності її охолодження;

Об'єкт дослідження – процеси теплообміну у багат шаровій системі, яка складає з оболонки лопатки, пористої вставки, насиченої рідиннометалевим теплоносієм, та ізолюючої стінки, яка охолоджується повітрям.

Предмет дослідження - тепловий стан охолоджуваних лопаток газових турбін, що оснащені пористими елементами з рідиннометалевим теплоносієм.

Метод дослідження – при вирішенні поставлених задач використовувалися методи теорії теплообміну, зокрема, методи моделювання процесів кипіння та конденсації рідини, чисельні методи рішення проблем теплопровідності і конвективного теплообміну.

Наукова новизна одержаних результатів.

- дістала подальший розвиток модель двофазного теплообміну в пористому середовищі;
- вперше розроблена математична модель процесу кипіння і динаміки рідиннометалевого теплоносія в пористих середовищах оточених оболонкою, що нерівномірно обігривається;
- вперше запропонована та теоретично обґрунтована можливість застосування пористих елементів з рідиннометалевим теплоносієм для вирівнювання температурного поля оболонки і збільшення ефективності її охолодження;
- удосконалена система охолодження направляючої лопатки газової турбіни за допомогою використання пористих елементів, насичених двофазним теплоносієм.

Практичне значення одержаних результатів. Практична значимість результатів роботи полягає у тому, що:

- створено метод проектування альтернативних систем охолодження вузлів та деталей газотурбінних і енергетичних установок;
- запропонована конструкція направляючої лопатки з пористою вставкою, що розташована по всьому обведенню профілю лопатки, що дозволяє вирівнювати температурне поле лопатки і забезпечити оптимальне охолодження;
- розроблено програмний комплекс з інтегрованим в AutoCAD інтерфейсом для розрахунків теплообміну в багат шаровій системі, що складає з цілісних та пористих елементів, насичених рідиннометалевим теплоносієм;
- результати роботи можуть бути використано для підприємств газотурбінобудування, таких як: ЗМКБ “Івченко-Прогрес”, м. Запоріжжя, НМКБ “Зоря”, м. Ніколаєв , ВАТ “Турбоатом”, м. Харків і ін.

Наукові і науково-методичні положення, одержані в дисертації, використовуються в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ “ХП” (акт впровадження від 5.04.2004 р).

Результати роботи втілені в практику інженерних розрахунків ООО „Актуальна механіка”, м. Харків (акт впровадження від 30 .06.2004 р).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, одержані автором самостійно. У роботах, написаних і опублікованих в співавторстві, автору належать наступні результати: Проведена оцінка можливості використання в якості охолоджуючого робочого тіла лопатки рідиннометалевий теплоносій, виконано вибір робочої рідини, капілярної структури для використання теплових труб в системах охолодження газових турбін; виконана оцінка величини максимального теплового потоку, що може передати обрана пориста структура, насичена теплоносієм; досліджено процеси кипіння і конденсації в двофазному термосифоні, який є гравітаційною тепловою трубою; розглянуто вплив зміни теплоносія і граничних умов на загальний характер плинину рідини в пористому середовищі і на розподіл функцій температури, тиску і вологовмісту; показана можливість використання пористих середовищ з рідиннометалевим теплоносієм в системах охолодження лопаток газових турбін для вирівнювання температурного поля в місцях різкої зміни граничних умов та представлено рішення проблеми теплового стану багат шаровій системи в сполученій постановці і приведені результати рішення модельних задач.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на наукових конференціях і семінарах: міжнародних науково-технічних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (Харків, 1999, 2001, 2003); 4-й міжнародній конференції "Обратные задачи:

идентификация, проектирование и управление” (Москва, 2003); міжнародній науково-технічній конференції “Удосконалення турбоустановок методами математичного моделювання”. (Зміїв, 2003); міжнародних конференціях „POWER ENGINEERING RESEARCH PROBLEMS”. (Варшава, 1999, 2003). У повному обсязі дисертація доповідалася на наукових семінарах кафедри турбінобудування НТУ “ХПІ”.

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 6 друкованих роботах. В провідних фахових виданнях України опубліковано 4 статті, у закордонних виданнях - 2 статті.

Структура дисертації. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів основного тексту, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації становить 146 сторінки машинописного тексту і містить 66 ілюстрацій, 6 з них на окремих сторінках, 7 таблиць, список використаних літературних джерел із 45 найменувань на 5 сторінках та додатки на 2 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовується актуальність дослідження, формулюється мета роботи і перелік розв’язуваних задач, вказується наукова новизна роботи та її практичне значення.

Перший розділ роботи присвячений сучасному стану проблеми проектування систем охолодження газотурбінних установок. Розглянуто досягнення у створенні повітряних і рідинних систем охолодження. Проаналізовано випадки застосування теплових труб і рідких металів у системах охолодження газових турбін. Дан теоретичний опис процесів, що відбуваються в теплових трубах.

Відмічено, що до теперішнього часу були головним чином спроби застосування термосифонів для охолодження робочих лопаток. При чому випарник термосифону був розміщений усередині оболонці лопатки, а конденсатор – в області обода диска. Теплові труби, в яких повернення теплоносія у випарник відбувається за рахунок капілярних сил, можуть бути використані в перспективі, про що свідчить аналіз літературних джерел. Проте їх застосування стримується відсутністю прийнятних технічних і теоретичних рішень. Це дозволило сформулювати задачу дослідження як створення методу моделювання процесів теплообміну і руху робочого тіла в пористій системі і обґрунтування можливості використання пористих систем, насичених рідкими металами, з метою охолодження лопаток газових турбін.

У **другому розділі** наведено математичну модель двофазного переносу в пористому середовищі Вонга і Беккермана, яка була адаптована до умов роботи лопаток ГТУ і чисельно вирішена методом кінцевих елементів. Сформульована і вирішена сполучена задача теплопровідності твердого тіла і пористого середовища, насиченого теплоносієм. Обґрунтовано фізичну модель процесів випару і конденсації в пористому середовищі і розглянутий фізичний

смысл капілярного тиску. Адекватність моделі і точність розроблених алгоритмів і програми було обґрунтоване зіставленням результатів розрахунку з експериментом.

Двофазна змішана модель містить у собі рівняння збереження маси, імпульсу та енергії, а також граничні і початкові умови, що були отримані на основі традиційної моделі незалежного руху фаз. Усі фізичні властивості багатофазної суміші є наслідком властивостей її складових, тому для побудови рівнянь збереження визначені усереднені властивості суміші: щільність суміші, масова швидкість суміші, кінематична в'язкість суміші:

$$\rho = \rho_l s + \rho_v (1 - s), \quad \rho \mathbf{u} = \rho_l \mathbf{u}_l + \rho_v \mathbf{u}_v, \quad \nu(s) = \frac{1}{\frac{k_{rl}(s)}{\nu_l} + \frac{k_{rv}(s)}{\nu_v}} \quad (1)$$

де s - вологовміст, що показує яка частина обсягу порожнеч зайнята рідиною, \mathbf{u} - вектор поверхневої (або Дарсиановської) швидкості, що відноситься до всієї області поперечного перетину як рідкої фази, так і пористого середовища, індекси l і v указують на рідинну або парову фази, відповідно.

Важливою характеристикою є капілярний тиск - різниця тисків парової і рідинної фази - за допомогою якого здійснюється рух середовища. Капілярний тиск визначається за допомогою функції Леверетта $J(S)$.

$$p_c = \left(\frac{\varepsilon}{K} \right)^{1/2} \sigma J(s), \quad (2)$$

де ε - об'ємна пористість, σ - поверхневий натяг, K - проникність.

Рівняння збереження маси для двофазної суміші є результатом додавання рівнянь збереження для кожної фази. Рівняння руху отримане на основі закону Дарсі з урахуванням наявності як рідкої, так і парової фаз.

Рівняння енергії отримане з загального рівняння збереження енергії для системи, що включає в себе тверду матрицю і багатофазну суміш. Передбачається, що в матриці, парі і рідинній фазі спостерігається термодинамічна рівновага. Рівняння енергії записується відносно ентальпії суміші, і враховує взаємні перетворення рідини в пар і навпаки.

$$\Omega \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma_h \mathbf{u} H) = \nabla \cdot \left(\frac{\Gamma_h}{\rho} \nabla H \right) + \nabla \cdot \left(f(s) \frac{K \Delta \rho h_{fg}}{\nu_k} \mathbf{g} \right) \quad (3)$$

Введені в (3) коефіцієнти, а саме, відношення теплоємностей Ω коефіцієнт корекції γ_h і дифузійний коефіцієнт Γ_h визначаються, відповідно, як:

$$\Omega = \varepsilon + \rho_s c_s (1 - \varepsilon) \frac{dT}{dH}, \quad \gamma_h = \left[s + \frac{\rho_v}{\rho_l} (1 - s) \right] \frac{\lambda_l(s)}{s}, \quad \frac{\Gamma_h}{\rho} = D + k_{eff} \frac{dT}{dH} \quad (4)$$

Рівняння (3) справедливо як для двофазної області, так і в області пара або рідини. У двофазній області передбачається, що передача енергії відбувається тільки за рахунок дифузії, а теплообмін між кістяком пористого тіла і теплоносієм відсутній.

У даній моделі для опису руху двофазної рідини використовується рівняння, записане щодо змину тиску суміші:

$$\nabla^2 P = \left[\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} - \nabla p \cdot \nabla \left(\frac{K}{\nu} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{K}{\nu} \rho_k g \right) \right], \quad (5)$$

у результаті рішення котрого одержують розподіл масових швидкостей фаз. Співвідношення для обчислення масових швидкостей фаз:

$$\rho_l \mathbf{u}_l = \lambda \rho \mathbf{u} + \mathbf{j}, \quad \rho_v \mathbf{u}_v = (1 - \lambda) \rho \mathbf{u} - \mathbf{j}. \quad (6)$$

Для одержання заключної системи алгебраїчних рівнянь, до рівняння енергії (3) застосовано метод Гальоркіна разом із застосуванням методу Кранка-Николсона для інтегрування по тимчасовій координаті.

$$\Omega \frac{H_j - H_{j-1}}{\Delta \tau} + \nabla \cdot (\gamma_{j-1/2} \mathbf{u}_{j-1/2} \frac{H_j + H_{j-1}}{2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\Gamma_{j-1/2}}{\rho_{j-1/2}} \nabla \frac{H_j + H_{j-1}}{2} \right) + \nabla \cdot \left(f_{j-1/2}(s) \frac{K \Delta \rho h_{fg}}{\nu_k} g \right) \quad (7)$$

Отримана система рівнянь вирішена модифікованим методом Гауса, зміст якого полягає у виключенні із системи рівнянь нульових елементів і представлення матриці у виді стрічки, симетричної щодо головної діагоналі:

$$\left(\frac{2}{\Delta \tau} \mathbf{C}^+ + \mathbf{S} \right) \mathbf{H}_j = 2 \mathbf{R} + \left(\frac{2}{\Delta \tau} \mathbf{C}^- \mathbf{H}_{j-1} + \mathbf{S} \right) \mathbf{H}_{j-1}, \quad (8)$$

де \mathbf{C}_j^- , \mathbf{S}_j^- - „нестационарна” і „стаціонарна” матриці відповідно, \mathbf{H}_j , \mathbf{H}_{j-1} - вектор-стовпець значень ентальпій на j -му і $(j-1)$ -м тимчасовому кроці, \mathbf{R} - вектор - стовпець, що відображає граничні умови.

Рівняння (5) було вирішено методом кінцевих елементів у нестационарній постановці для двовимірного випадку, зміст якого полягає у мінімізації функціонала:

$$I = \frac{1}{2} \int_A \left[\frac{1}{\nu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{1}{\nu} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} - 2QP \right] dA + \int_{S_u} \mathbf{u} P dS, \quad (9)$$

де $Q = \varepsilon \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla p \cdot \nabla \left(\frac{K}{\nu} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{K}{\nu} \rho_k g \right)$ - права частина рівняння (5).

Виконав ряд перетворень, отримана система лінійних алгебраїчних рівнянь $\mathbf{A} \bar{P} = \bar{F}$, яка була вирішена методом сполучених градієнтів. Рішення системи рівнянь дозволяє одержати розподіл тисків двофазної суміші, і, використовуючи рівняння (6), одержати розподіл масових швидкостей парової і рідкої фаз.

Для моделювання температурного стану багаточислової системи були сформульовані умови сполучення і вирішена сполучена задача теплопровідності твердого тіла і пористого середовища, насиченого теплоносієм.

Рівняння енергії для твердого тіла звичайно представляється щодо температури:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T, \quad (10)$$

де C - об'ємна теплоємність, λ - теплопровідність.

Рішення цього рівняння було виконано за допомогою техніки аналогічної приведеної для пористого середовища. Властивості твердого тіла (C , λ) залежать від температури в меншій мірі, чим Ω і Γ в рівнянні енергії двофазного середовища (3). Тому збіжність цього рішення краще.

Для рішення спільної задачі теплопровідності твердого і пористого тіл, вводяться умови сполучення. Реалізовано два підходи до рішення цієї проблеми: роздільний і спільний. Перший підхід полягає в послідовному рішенні проблеми для кожного з тіл (суцільного і пористого). В другому підході вирішується повна система рівнянь для двох тіл разом з додатковими рівняннями зв'язку.

Для рішення даної задачі створено програмний комплекс, який складається з ряду підсистем. Основними підсистемами комплексу є: підсистема введення інформації, підсистема виконання розрахунків, підсистема висновку результатів розрахунку і їх візуалізація.

Підготовка геометричної моделі здійснюється за допомогою системи AutoCAD. Завдання граничних і початкових умов відбувається відповідно до геометричної моделі в спеціальному файлі вихідних даних.

Створена геометрична модель використовується і для графічного представлення результатів розрахунку теплового стану багаточарової системи. Також мається можливість автоматичного формування документації, що містить результати розрахунку.

Рішення задачі проводиться в ітераціях як за часом (зовнішній цикл) так і на кожному тимчасовому кроці (внутрішній цикл), де коректуються властивості середовища, що істотно залежать від величини насичення. На внутрішньому циклі формуються системи лінійних алгебраїчних рівнянь для пористого середовища і твердого тіла, задаються граничні умови на стикувальних поверхнях.

Для доказу адекватності моделі і точності розроблених алгоритмів і програми, було проведене зіставлення результатів розрахунку з даними фізичного експерименту.

У зв'язку з тим, що не було знайдено докладно описаних експериментів, проведених для дослідження двофазного плинну рідиннометалевих теплоносіїв у пористому середовищі, для зіставлення обраний експеримент, проведений Юделлом по дослідженню тепло і масообміну в системі пісок – вода – пар, що обігрівается зверху й охолоджується знизу.

У результаті проведення експерименту встановлено, що в стаціонарних умовах у системі маються три різні області (рис. 1 а)). Температура верхньої області перевищує температуру насичення і лінійно змінюється в міру видалення від джерела теплоти.

У нижній області, де відповідно до вимірів, температура нижче температури насичення, профіль температури теж лінійний. Ці результати свідчать про перевагу механізму теплопровідності. Область між верхньої нижньої зонами теплопровідності майже ізотермічна і з точністю 1°C знаходиться поблизу температури насичення. Тут переважним механізмом тепловіддачі є конвекція.

Зіставлення експериментальних даних і результатів чисельного рішення дало практично точний збіг. Температурний профіль, отриманий у результаті чисельного рішення представлений на рис.1.б). Тут також показане існування зони рідини, зони пару і двофазної ізотермічної зони з температурою насичення 100°C .

У третьому розділі розглянуто проблеми вибору пористих елементів і робочих рідин для використання в системах охолодження газових турбін для вирівнювання температурного поля лопаток, виконане дослідження впливу функції Леверетта на процеси двофазного переносу

в пористому середовищі. Наведені результати рішення модельних задач для апробації моделі двофазного переносу в пористому середовищі.

Вибір теплоносія може вплинути на ефективність передачі теплоти. В умовах високих температур підходять рідиннометалеві теплоносії, що мають найкращі теплопередаючі властивості. До них відносяться калій, натрій, літій. Однак, при використанні літію, лопатка повинна бути виготовлена з дорогого сплаву, хімічно стійкого стосовно літію. Зіставлення властивостей калію і натрію показала помітні переваги останнього. Тому всі розрахунки виконані для натрію.

При виборі матеріалу, з якого буде виготовлена пориста структура, необхідно упевнитися в сумісності матеріалу з теплоносієм. У випадку з натрієм можуть бути використаними хромонікелеві нержавіючі сталі (1X18H10T, 1X18H9, 1X16H15M3B) і нікель. Термін служби таких пористих структур більш ніж ресурс двигуна і складає $1,3 \cdot 10^5$ ч при зміні кисню $2 \cdot 10^{-3} \%$ у натрію.

Серед різноманітних пористих матеріалів, що зараз виробляються, були підібрані ті, що відповідають умовам використання пористих елементів в системах охолодження. Ці елементи мають бути тонкими що дозволяє їх розмістити на внутрішній поверхні лопатки. В той же час вони повинні бути спроможними передавати необхідний тепловий потік, що можливо при належній величині дифузії D . На D впливають проникність, яка залежить від діаметра пір - чим він більше, тим краще проникність середовища. Однак варто врахувати, що зменшення діаметра пір дозволяє створювати більший капілярний напір, що важливо для взаємно протилежного плинину рідкої і парової фаз теплоносія. Тому величина проникності і діаметр пір повинні підбиратися одночасно для забезпечення продуктивної роботи пористого резервуара.

Використовувана двофазна модель базується на функції Леверетта, що була отримана для низькотемпературних процесів витиснення водою нафти з ґрунту й ін. Для випадку рідиннометалевих середовищ безпосередніх досвідів проведено не було. Тому логічно проведення аналізу впливу невизначеності поведження функції на результати моделювання теплообміну у високотемпературних пористих елементах, насичених рідинними металами.

Для визначення величини капілярного тиску в літературі застосовують дані дренажування, усмоктування або криву середніх значень між цими двома граничними випадками. Юделл узагальнив дані для капілярного тиску усмоктування, отримані Левереттом для процесів у теплових трубах за допомогою вираження:

$$J(s) = 1,417(1-s) - 2,120(1-s)^2 + 1,263(1-s)^3. \quad (11)$$

Крива $J(s)$, отримана Юделлом, а також криві дренажу й усмоктування, отримані Левереттом зображені на рисунку 2.

Були проведені тестові розрахунки з обліком різних модифікацій J – функції. Аналізуючи результати розрахунків, що показали маленьку зміну величини насиченості, можна зробити висновок, що деяка невизначеність функції Леверетта не робить значного впливу на режими плинку двофазної рідини в пористому середовищі.

Пропонований спосіб вирівнювання температурного поля заснований на застосуванні цілком ізольованих резервуарів, усередині яких взаємне переміщення пару і рідини здійснюється тільки внаслідок дифузії. Зрозуміло, що інтенсивність дифузії залежить від багатьох факторів і в частковості від розмірів резервуара. Тому були виконані розрахунки на моделі, геометричні розміри якої дозволяли розмістити неї усередині лопатки турбіни. Так для направляючої лопатки з хордою менш ніж 100 мм значна зміна теплових потоків може відбуватися на ділянці довжиною 15-20 мм. Тому для модельних задач був використаний пористий елемент довжиною 18 мм і товщиною 2 мм, що дозволяє його закріпити на внутрішній стороні оболонки лопатки. Було визначено граничні умови, що відповідають реальним умовам роботи лопаток газових турбін. Відомо, що найбільші коефіцієнти тепловіддачі від газу можуть виникати в місті зустрічі лопатки з потоком на вхідній кромці і мати значення $5000 - 6000 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$. При використанні повітряної системи охолодження максимальне охолодження поверхні лопатки складає $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Тому максимальний тепловий потік, сприйнятий поверхнею лопатки від газу розрахований як $q = \alpha (T_a - T_{no}) = \alpha \Delta T$, може бути оцінено величиною $1.8 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

Були розглянуті одношарові, двошарові і тришарові пористі моделі з нерівномірним підведенням теплового навантаження.

Був розглянутий пористий резервуар, що складається з двох шарів, на верхній границі якого задані теплові потоки, що забезпечують нерівномірне нагрівання резервуара. З внутрішньої сторони підтримується задана температура насичення теплоносія, рівна $881,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис.3). Задача складалася в аналізі розподілу ліній насичення, масових швидкостей пару і температурного поля. Розрахунки показали, що при заданих граничних умовах пористий резервуар весь зайнятий двофазною зоною теплоносія з температурою насичення $881,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Про це свідчить розподіл ліній насичення, представлений на рисунку 4.

Розподіл масових швидкостей рідкої і парової фази теплоносія (рис. 5) свідчить, що повного скипання теплоносія не має місця і що двофазна ізотермічна зона утвориться за рахунок протилежно спрямованого руху дифундуючих друг у друга двох фаз теплоносія.

Розрахунок температурного поля цілком металевої оболонки при тих же граничних умовах показав, що в цьому випадку зміна температури по зовнішньої поверхні оболонки складає 123°C . Температура змінюється від 1023°C до 890°C в зонах максимальних і мінімального теплових потоків відповідно (рис.6).

Двошарова модель являє собою пористий резервуар довжиною 18 мм із локальним підведенням і відводом теплоти (рис.7). Крім того є присутнім адіабатична ділянка, що є так називаною транспортною зоною. Ціль цього дослідження показати можливість передачі теплоти двофазним теплоносієм на задану відстань.

У розрахунках варіювалися величини проникності. Розглядалися варіант з однаковою величиною проникності по всьому пористому резервуарі і варіант зі створенням транспортного шару з більшою величиною проникності.

Розподіл ліній насичення показує, що у випадку наявності транспортної зони на поверхні пористого резервуара залишається менша кількість пару за рахунок відводу його через шар з більшою проникністю (рис.8). Крім того, лінії насичення розташовані густіше в місцях зміни граничних умов, що свідчить про інтенсивний тепло- і масообмін саме на цих ділянках. Це відбиває і розподіл масових швидкостей пару, показані на рисунку 9.

Моделювання вхідної кромки лопатки турбіни виконано за допомогою тришарова моделі. Були проведені порівняльні тестові розрахунки температурного поля металевої вхідної кромки (рис.10) і вхідної кромки з пористою вставкою (рис.11). Як матеріал для пористого елемента використовувався спечений сталевий порошок пористістю 0,6. З зовнішньої сторони вхідної кромки задавалася температура натікання газу і зміна коефіцієнта тепловіддачі газу по обведенню кромки. З середини кромка охолоджувалася повітрям з дефлектора з заданою температурою і коефіцієнтом тепловіддачі.

На рисунку 10 зображена вхідна кромка лопатки без пористої вставки. При заданих граничних умовах тут спостерігається зміна температури уздовж зовнішньої стінки від 909°C при $\alpha_m=2000 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ до 1000°C при $\alpha_m=6000 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$. Градієнт температур складає 91°C .

На рисунку 11 зображена вхідна кромка з пористою вставкою. Тут на зовнішній поверхні зміна температури складає 26°C . Усередині пористого елемента знаходиться ізотермічна двофазна зона з температурою, рівній температурі насичення теплоносія. Величина двофазної зони визначається лініями насичення, що показують, що насиченість пористого елемента рідкою фазою теплоносія змінюється від 5 % поблизу зони нагрівання до 95 % поблизу зони охолодження. Причому значення насичення менше і лінії розташовані густіше в тій зоні, де коефіцієнти тепловіддачі від газу вище.

У даному варіанті показано, що пористий елемент із двофазним теплоносієм сприяє вирівнюванню температурного поля по поверхні зовнішньої оболонки, про що говорить невеликий градієнт температур - 26°C .

Проведений аналіз процесів кипіння і конденсації натрію в пористому середовищі показав можливість його використання для теплової стабілізації елементів газових турбін у реальних умовах великих теплових потоків. Виявилось можливим одержати оптимальне співвідношення між проникністю пористого середовища і геометричних розмірів пористого елемента, що забезпечують транспорт теплоносія при можливих максимальних величинах теплових потоків. При цьому практично по всьому обсязі пористого елемента спостерігався двофазний режим, що гарантувало його дуже близьке до ізотермічного стану.

У четвертому розділі виконано модернізацію системи охолодження направляючої лопатки високотемпературної газової турбіни за рахунок застосування пористої підкладки, насиченої рідиннометалевим теплоносієм. Як прототип була використана направляюча лопатка турбіни високого тиску авіаційного двигуна.

На рисунку 12 надані результати розрахунку температурного поля оболонки лопатки по запропонованій у дисертаційній роботі методиці. Було виконане зіставлення з результатами розрахунку у системі ANSYS 6.1. Зіставлення показало, що результати розрахунків аналогічні, що дозволяє говорити про надійність розробленої програми. При заданих граничних умовах температурне поле оболонки досить нерівномірне. Максимальна температура спостерігається в районі вихідної кромки і складає порядку 1020°C . Температура на вхідній кромці складає близько 838°C , що досягається струминним охолодженням повітрям з дефлектора. Градієнт температур по опуклій і увігнутій частині лопатки досягає $100 - 150^{\circ}\text{C}$.

Застосування уздовж обведення профілю пористої вставки, насиченої двофазним теплоносієм при температурі насичення 765°C привело до вирівнювання температурного поля і зменшенню температур вхідної і вихідної кромки (рис. 13).

Граничні умови з боку газу і повітря зберігаються. Пориста вставка має товщину 3 мм, що в 2 рази перевищує товщину оболонки. У зв'язку з тим, що в області вихідної кромки лопатки вузький перетин, пористу структуру там розмістити не вдається.

У цьому випадку температура вихідної кромки опустилася до 970°C , а вхідний – до 820°C . Різко зменшилися градієнти температур на опуклій і увігнутій поверхнях у місцях установки пористої структури і склали порядку 13°C . Значення насичення в пористій структурі в середньому складає 47% (рис.14). Різна інтенсивність двофазного переносу і дозволяє досягти вирівняного температурного поля оболонки.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена рішення науково-практичної задачі створення альтернативних систем охолодження на основі застосування пористих елементів, насичених рідиннометалевим теплоносієм. Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. На основі моделі двофазного теплообміну в пористому середовищі вперше розроблено математична модель процесу кипіння і динаміки рідиннометалевого теплоносія в пористих середовищах, оточених оболонкою, що нерівномірно обігривається. Рішення цієї проблеми дозволяє проектувати ефективні системи охолодження теплонапружених деталей газових турбін на основі застосування пористих елементів з рідиннометалевим теплоносієм які вирівнюють температурне поле і збільшують ступень охолодження .

2. Розроблено розрахунковий метод і відповідну програму для ЕОМ з інтегрованим у AutoCAD інтерфейсом, що істотно підвищує можливості проектувальника.

3. Доведено адекватність математичної і фізичної моделі двофазного теплообміну в зіставленні з експериментом.

4. Оцінено вплив різних факторів, що входять у модель двофазного теплообміну на результати розрахунків, а саме пористості, проникності та форми функції Леверетта.

5. Обґрунтовано вибір матеріалу пористого резервуара відповідно до вимог сумісності з робочою рідиною, а також здійснений вибір оптимальних розмірів пористого резервуара.

6. Вирішені модельні задачі, результати яких наявно свідчать про можливість пористих елементів передавати необхідний тепловий потік і вирівнювати температурне поле оболонки лопатки в умовах, які мають місце у газових турбінах.

7. Обґрунтовано застосування пористих вставок з рідиннометалевим теплоносієм на вхідній кромці лопатки та по всьому профілю. Завдяки проведеним конструкційним змінам вдалося одержати рівномірне температурне поле лопатки і забезпечити її необхідне охолодження.

8. Наукові і науково-методичні положення, одержані в дисертації, використовуються в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ “ХП”, втілені в практику інженерних розрахунків ООО „Актуальна механіка”, м. Харків .

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тарасов А.И., Литвиненко О.А. Оценка возможности применения жидкометаллических теплоносителей для охлаждения лопаток газовых турбин. //Информационные технологии: наука,

техника, технология, образование, здоровье: сборник научных трудов.- Харьков: ХГПУ – 1999. - Вып.7 - Ч 3. – С. 81-84.

Здобувачем проведена оцінка можливості використання в якості охолоджуючого робочого тіла рідиннометалевого теплоносія наряду з повітряним охолодженням деталей газових турбін.

2. Тарасов А.И., Литвиненко О.А. Методика расчета теплообменного аппарата с термосифонными трубками. // Вестник Национального технического университета “ХПИ”: Сборник научных трудов. - Харьков: НТУ “ХПИ”.- 2001. - №7 - С. 217-223.

Здобувачем досліджено процеси кипіння і конденсації в двофазному термосифоні (гравітаційна теплова труба).

3. Тарасов А.И., Литвиненко О.А. Применение пористых сред для выравнивания температурного поля элементов газовых турбин. //Вестник Национального технического университета “ХПИ”: Сборник научных трудов. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2002. - №9. - Т. 12. – С. 175 – 180.

Здобувачем розглянуто вплив зміни теплоносія і граничних умов на загальний характер плинну рідини в пористому середовищі і на розподіл функцій температури, тиску і вологовмісту.

4. Тарасов А.И., Литвиненко О.А. Использование элементов с жидкометаллическим теплоносителем в системах охлаждения газовых турбин. //Совершенствование турбоустановок методами математического моделирования: Сб. научн. трудов – Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. - 2003. – Т.1. – С. 270-274.

Здобувачем показана можливість використання пористих середовищ з рідиннометалевим теплоносієм в системах охолодження лопаток газових турбін для вирівнювання температурного поля в місцях різкої зміни граничних умов.

5. Тарасов А., Литвиненко О. Evaluation of the possibility of liquid – metal using for gas turbine cooling. // Problemy badawcze energetyki cieplnej: Prace naukowe. Mechanika. – Warszawa: Politechnika Warszawska. - 1999. – z. 181. – P.287-293.

Здобувачем виконано вибір робочої рідини, капілярної структури для використання в системах охолодження газових турбін. Виконана оцінка величини максимального теплового потоку, що може передати обрана пориста структура, насичена теплоносієм.

6. Тарасов А., Литвиненко О. Implementation of heat pipes for gas turbine cooling. //Problemy badawcze energetyki cieplnej: Prace naukowe. Mechanika. – Warszawa:Politechnika Warszawska. – 2003. - z. 202. – P.283-290.

Здобувачем представлено рішення проблеми теплового стану багаточарової системи в сполученій постановці і приведені результати рішення модельних задач.

АНОТАЦІЇ

Литвиненко О.О. Удосконалювання систем охолодження лопаток газових турбін на основі застосування рідиннометалевих теплоносіїв. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.16. – Турбомашини та турбоустановки. – Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2004.

Аналіз сучасного стану проблеми застосування теплових труб показав, що використання теплових труб для охолодження елементів газових турбін обмежено в зв'язку з різноманіттям положень у просторі охолоджуваних елементів і, отже, різним впливом сил гравітації на них. Однак перспективним виявляється використання теплових труб для вирівнювання температурного поля тіл у тих місцях, де граничні умови змінюються досить різко. Прикладом таких високонапружених елементів є вхідна кромка направляючих і робітників лопаток, область ламінарно - турбулентного переходу. У зв'язку з цим становить інтерес дослідження можливості зниження градієнтів температури уздовж оболонки лопатки за рахунок установки пористої підкладки з рідиннометалевим теплоносієм на внутрішній поверхні лопатки. Таким чином, проблема зводиться до рішення задачі теплового стану багатошарової системи, що складає з оболонки лопатки, що нагрівається, пористого середовища, заповненого рідиннометалевим теплоносієм і внутрішньої охолоджуваної повітрям ізолюючої тонкої стінки.

На відміну від традиційних схем теплових труб у даному випадку пропонується система без паровідводящих каналів, тобто цілком замкнутий пористий резервуар, у якому підтримується двофазний стан теплоносія, а передача теплоти здійснюється взаємно протилежним рухом пару і рідини внаслідок дифузії. Основною проблемою при рішенні даної задачі було моделювання процесів руху і фазового переходу в пористому середовищі, заповненому теплоносієм, а також розробка умов стикування твердого і пористого елементів.

У дисертаційній роботі проведено теоретичні дослідження руху двофазного рідиннометалевого теплоносія усередині пористого елемента при заданих граничних умовах, стосовно до умов роботи газової турбіни. Розроблена математична модель застосування пористого елемента, насиченого рідиннометалевим теплоносієм для підвищення ефективності охолодження та вирівнювання температурного поля в місцях різкої зміни граничних умов. Створена методика розрахунку охолодження лопаток з використанням традиційного конвективного засобу разом з тепловими трубами. Проведена апробація цієї методики на прикладі соплової лопатки першого ступеня газотурбінного двигуна.

Рішення даної проблеми дозволяє проектувати охолоджувані елементи газових турбін на основі застосування пористих вставок з рідиннометалевим теплоносієм для вирівнювання температурного поля оболонки і збільшення ефективності її охолодження.

Ключові слова: система охолодження, рідиннометалевий теплоносій, двофазна рідина, багатошарова система, пористий резервуар, капілярний тиск.

Литвиненко О.А. Совершенствование систем охлаждения лопаток газовых турбин на основе применения жидкометаллических теплоносителей. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16. – Турбомашины и турбоустановки. – Национальный технический университет „Харьковский политехнический институт”, Харьков 2004.

Задачи совершенствования стационарных и транспортных газотурбинных установок и газотурбинных двигателей всех типов решаются путем освоения все более высоких температур газа (T_g). Поскольку темпы повышения жаропрочности сплавов для газовых турбин существенно отстают от роста T_g , единственным реальным путем повышения T_g в ближайшем будущем остается применение охлаждения наиболее нагретых и наиболее нагруженных деталей газовых турбин, в первую очередь сопловых и рабочих лопаток. Поэтому исследование и разработка проблем освоения высоких температур газа в газотурбинных установках посредством применения высокоэффективного охлаждения деталей турбин является одним из наиболее актуальных направлений развития современного газотурбиностроения.

Тепловые трубы с пористым наполнителем обладают очень высоким коэффициентом приведенной теплопроводности, что позволяет их применять для передачи больших тепловых мощностей при практически изотермических условиях. В этом смысле их применение чрезвычайно привлекательно для охлаждения элементов газовых турбин.

Анализ современного состояния проблемы применения тепловых труб показал, что использование тепловых труб для охлаждения элементов газовых турбин ограничено в связи с многообразием положений в пространстве охлаждаемых элементов и, следовательно, различным воздействием сил гравитации на них. Однако перспективным оказывается использование тепловых труб для выравнивания температурного поля тел в тех местах, где граничные условия изменяются достаточно резко. Примером таких высоконагруженных элементов является входная кромка направляющих и рабочих лопаток, область ламинарно-турбулентного перехода. В связи с этим представляет интерес исследование возможности снижения градиентов температуры вдоль оболочки лопатки за счет установки пористой подложки с жидкометаллическим теплоносителем на внутренней поверхности лопатки. Таким образом, проблема сводится к решению задачи теплового состояния многослойной системы, состоящей из нагреваемой оболочки лопатки,

пористой среды, заполненной жидкометаллическим теплоносителем и внутренней охлаждаемой воздухом изолирующей тонкой стенки.

В отличие от традиционных схем тепловых труб в данном случае предлагается система без пароотводящих каналов, т.е. полностью замкнутый пористый резервуар, в котором поддерживается двухфазное состояние теплоносителя, а передача теплоты осуществляется взаимно противоположным движением пара и жидкости вследствие диффузии. Основной проблемой при решении данной задачи являлось моделирование процессов движения и фазового перехода в пористой среде, заполненной теплоносителем, а также разработка условий стыковки твердого и пористого элементов.

В диссертационной работе проведены теоретические исследования движения двухфазного жидкометаллического теплоносителя внутри пористого элемента при заданных граничных условиях, применительно к условиям работы газовой турбины.

Разработана математическая модель применения пористого элемента, насыщенного жидкометаллическим теплоносителем для повышения эффективности охлаждения и выравнивания температурного поля в местах резкого изменения граничных условий.

Создана методика расчета охлаждения лопаток с использованием традиционного конвективного средства вместе с пористыми элементами.

Доказана адекватность математической и физической модели двухфазного теплообмена в сопоставлении с экспериментом.

Обосновано применение пористых вставок с жидкометаллическим теплоносителем на входной кромке лопатки и по всему профилю. Благодаря проведенным конструкционным изменениям удалось получить равномерное температурное поле лопатки и обеспечить ее необходимое охлаждение.

Решения данной проблемы позволяет проектировать охлаждаемые элементы газовых турбин на основе применения пористых вставок с жидкометаллическим теплоносителем для выравнивания температурного поля оболочки и увеличения эффективности ее охлаждения.

Ключевые слова: система охлаждения, жидкометаллический теплоноситель, двухфазная жидкость, многослойная система, пористый резервуар, капиллярное давление.

Litvinenko O.A. Gas turbine system cooling development for the blades basing on liquid-metal heat carriers. – Manuscript.

The Candidate of Technical Science Thesis on speciality 05.05.16 – Turbo-machine and turbine units. – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2004.

The analysis of thermal pipes application showed that the implementation of thermal pipes for cooling of elements of gas turbines is limited by the variety of placing in space of the cooled elements

and, consequently, by a different influence of gravitation. However there is a wide perspective to use thermal pipes for temperature smoothing of bodies in those places, where the incoming heat flux changes rapidly along the boundary. The leading edge of nozzle vanes/blades and zone closely to boundary with laminar-turbulent transition are the samples of such high-loaded elements. There was performed a research for decreasing temperature gradients along the turbine blade by means of porous reservoirs with liquid-metal heat carrier that were fastened on internal shell surface. Thus, a problem was presented as of the thermal state of the multilayer system, consisting of the heated shell of blade and porous reservoir that was filled by liquid-metal heat carrier. The system was cooled by air that flowed along inside insulating porous reservoir thin wall.

Unlike the traditional design of thermal pipes it was propagated the system without steam channels, i.e. a fully reserved porous reservoir. Two phase heat carrier condition provided the heat transfer through system due to concurrent steam/liquid fluxes.

A basic problem was the modelling of the flow and phase changing in the porous reservoir and implementation the models for gas turbine cooling. Developed method was approved by matching experimental and calculated data. The method was used for design of nozzle vane and blades of the gas turbine.

Keywords: cooling system, liquid-metal heat carrier, two phase fluid, multilayer system, porous reservoir, capillary pressure.