

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

ДОЛГОВ ОЛЕКСАНДР ІГОРОВИЧ



УДК 621.438:621.45.038.3

**ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ
РОЗРАХУНКІВ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ГАЗОВИХ ТУРБІН**

Спеціальність 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Тарасов Олександр Іванович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри турбінобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Черноусенко Ольга Юріївна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
в.о. завідувача кафедри теплоенергетичних установок
теплових і атомних станцій

кандидат технічних наук, доцент
Петухов Ілля Іванович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»,
доцент кафедри аерокосмічної теплотехніки

Захист відбудеться 14 травня 2015 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий «4» квітня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для забезпечення конкурентоспроможності газотурбінних установок (ГТУ) і газотурбінних двигунів (ГТД) одними з найважливіших вимог є надійність і паливна економічність. Ці вимоги суперечливі, оскільки збільшення економічності та необхідне для цього збільшення температури газу перед турбіною призводить до зниження надійності двигуна через погіршення міцнісних властивостей матеріалів деталей. Максимізація однієї з цих вимог призведе до мінімізації іншої, проте обидві ці вимоги вимагають взаємної ув'язки.

Створення ГТУ (ГТД), що працюють при температурах близьких 2000 К, пов'язано з вирішенням комплексу проблем з розробки ефективного охолодження деталей і вузлів газових турбін, яке забезпечує їх надійну роботу в умовах тривалої експлуатації при мінімальних витратах повітря на охолодження. Системи охолодження сучасних газових турбін є складними гідравлічними мережами, що налічують сотні елементів, доцільним стає завдання оптимізації систем охолодження з урахуванням великого числа параметричних і функціональних обмежень, що накладаються конструктивними та експлуатаційними особливостями газотурбінного агрегату. Таким чином, створення надійних методів оптимізації систем охолодження газових турбін, що дозволяють забезпечити припустимі рівні температур і термічних напружень в охолоджуваніх деталях при мінімальних витратах на охолодження, має важливе значення для підвищення економічності та надійності газотурбінних установок.

Надійність результатів оптимізації залежить від ступеню адекватності математичних моделей, які використовуються для розрахунку цільової функції – витрати охолоджуючого повітря і для розрахунку обмежень – температур деталей турбін. Результати розрахунків останніх напряму залежать від граничних умов у каналах охолодження. Зокрема, коефіцієнтів тепловіддачі, для визначення котрих застосовують обмежений набір рівнянь подібності, з чого випливає задача аналізу і корегування цих рівнянь для умов роботи систем охолодження газових турбін.

Таким чином, теплогідравлічне обґрунтування моделі оптимізації систем охолодження в цілому є актуальною науково-практичною задачею, яка дозволяє зробити наступний крок у підвищенні якості і надійності проектування систем охолодження газових турбін.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано на кафедрі турбінобудування НТУ «ХП». Здобувач був виконавцем держбюджетних тем МОН України: «Дослідження охолодження рідкометалевим теплоносієм напрямних лопаток газових турбін» (ДР №0111U002266, 2011– 2012), «Розвиток методів розрахунку охолодження роторів газових турбін та створення ефективною системи охолодження ротора високотемпературної газової турбіни» (ДР №0113U000431, 2013– 2014).

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – обґрунтування оптимізаційної моделі розрахунків системи охолодження газових турбін шляхом по-

дальшого розвитку методів аналізу теплового стану газових турбін і гідравлічних схем систем охолодження.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

1. Адаптація методів оптимізації конструкції системи охолодження газових турбін за критерієм мінімізації витрати повітря, створення алгоритму для комп'ютерної реалізації;
2. Обґрунтування застосування критеріальних співвідношень для розрахунку тепловіддачі в каналах охолодження та їх приведення до відповідних умов, характерних для газових турбін;
3. Удосконалення методів теплогідравлічного розрахунку систем охолодження газових турбін;
4. Верифікація оптимізаційної моделі розрахунків систем охолодження для лопаток газових турбін.

Об'єкт дослідження – процеси течії і теплообміну у високотемпературних газових турбінах.

Предмет дослідження – оптимізація конструкції системи охолодження лопаток газових турбін за критерієм мінімізації витрати повітря.

Методи дослідження. Теоретичні положення дисертації базуються на фундаментальних основах теорії теплообміну, гідродинаміки, чисельних методах розв'язування задач теплопровідності, конвективного теплообміну, методах розрахунку розгалужених гідравлічних мереж. Зокрема, для розрахунків гідравлічних мереж систем охолодження використано метод, оснований на теорії графів; для розрахунків теплового стану лопатки турбіни – метод кінцевих елементів, для аналізу теплообміну в каналах охолодження – численні методи розрахунку в'язкої рідини.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше обґрунтовано і розроблено поетапну методику оптимізації системи охолодження газових турбін, яка спирається на послідовні розрахунки схем охолодження з застосуванням одновимірної і двовимірної теорії теплопровідності для визначення температур лопаток, що дозволяє провести оптимізацію системи охолодження лопаток газових турбін, варіюючи майже 50 геометричними параметрами каналів охолодження;

2. Дістали подальшого розвитку методи розрахунку теплового стану газових турбін і їх гідравлічних систем охолодження за рахунок застосування уточнених рівнянь подібності для тепловіддачі в каналах охолодження, що дозволяє уточнити температуру поверхні лопаток газових турбін на 30...50 °С і необхідну витрату охолоджуючого повітря;

3. На основі чисельних експериментів отримані нові дані з впливу температурного фактора на тепловіддачу в каналах охолодження. Вперше встановлено, що великий температурний напір, який характерний для каналів охолодження газових турбін, має суттєвий вплив на тепловіддачу у гладких каналах, а у каналах з турбулізаторами, де має місце інтенсивне змішування повітря, вплив температурного фактора на тепловіддачу нівелюється.

Практичне значення одержаних результатів для галузі турбінобудування полягає у наступному:

1. Створено метод та його комп'ютерна реалізація для розрахунку і оптимізації систем охолодження газових турбін. Комп'ютерна програма пройшла верифікацію і застосовується на підприємствах газотурбінобудування, що позиціонує її як обов'язковий елемент у низці програм проектування газових турбін;

2. Наведено результати чисельного аналізу тепловіддачі в найбільш важливих типах каналів охолодження газових турбін, на основі якого дано рекомендації щодо застосування рівнянь подібності теплообміну в умовах, які є характерними для газових турбін;

3. Розроблено рекомендації щодо оптимізації систем охолодження лопаток газових турбін з урахуванням обмежень на температуру металу і на геометричні характеристики каналів охолодження;

4. Обґрунтовано інженерний підхід для розв'язання тривимірних задач теплопровідності, характерних для елементів газових турбін, у двовимірній постановці.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв), ТОВ «ІК Актуальна механіка» (м. Харків) і у навчальний процес НТУ «ХП» кафедри турбінобудування (м. Харків) в курсах лекцій «Проблеми теплообміну в ПТУ і ГТУ», «Охолодження ГТУ».

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведено критичний аналіз методів оптимізації та обґрунтовано застосування методу ЛП-пошуку для оптимізації систем охолодження газових турбін; розроблено поетапну методику оптимізації, яка складається з оптимізації гідравлічної схеми системи охолодження з використанням наближеного розрахунку температур поверхонь лопаток і чисельного розрахунку температурних полів лопаток турбін; розроблено алгоритм оптимізації та відповідний програмний код; проведено чисельне дослідження і аналіз теплообміну в каналах охолодження круглого і прямокутного перерізу, а також у каналах з поперечними ребрами, на ділянці повороту потоку, при струменевому натіканні повітря на вхідну кромку лопатки; проведено оптимізацію систем охолодження лопаток турбін з дефлекторною і петельною схемами руху повітря.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Проблеми енергосбереження України и пути их решения» (Харків, 2008, 2009, 2011), Міжнародних науково-технічних конференціях: «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування» (Харків, 2012, 2013, 2014), XIII Всеросійській міжвузівській конференції «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели» (Москва, 2008), Міжнародній науковій конференції «Моделирование-2008» (Київ, 2008), Міжнародній науковій конференції «Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації» (Київ, 2012), XV Міжнародній науково-технічній конференції Асоціації спеціалістів промис-

лової гідравліки і пневматики «Промислова гідравліка і пневматика» (Мелітополь, 2014).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображено в 14 наукових публікаціях, з них: 7 – у наукових фахових виданнях України (2 входять до міжнародної наукометричної бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)), 1 – у закордонному періодичному фаховому виданні, 4 – у матеріалах конференцій, 2 – свідоцтва про офіційну реєстрацію програм для ЕОМ.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків. Повний обсяг дисертації становить 166 сторінок, серед них 74 рисунка за текстом, 5 рисунків на окремих 3 сторінках, 5 таблиць за текстом, списку використаних джерел з 102 найменувань на 11 сторінках, додатка на 3 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, сформульовано мету роботи і перелік вирішуваних задач, вказано наукову новизну роботи і її практичне значення.

У першому розділі наведено аналіз науково-технічних публікацій, пов'язаних з сучасними тенденціями проектування систем охолодження газових турбін та методами їх розрахунку. Відзначено, що найбільш ефективним методом розрахунку систем охолодження є метод, заснований на теорії графів. Встановлено, що проблема комп'ютерної оптимізації систем охолодження є доцільною з урахуванням значних витрат часу на її проектування. Тому виконано систематизацію методів оптимізації в цілому і оцінено їх придатність для удосконалення систем охолодження газових турбін. Зроблено аналіз численних досліджень тепловіддачі в каналах охолодження, виявлено особливості використання критеріальних співвідношень тепловіддачі для умов роботи газових турбін. Обґрунтовано ряд проблем за напрямом дослідження, на підставі якого поставлені задачі дослідження.

У другому розділі виконано вдосконалення методів розрахунку систем охолодження газових турбін на основі ефективного методу аналізу гідравлічних мереж та задач теплопровідності, методу оптимізації систем охолодження за критерієм мінімізації витрати повітря.

Характерною особливістю системи охолодження є значні зміни тиску і температури повітря по мірі його просування від компресора до кінцевих вузлів, розташованих в проточній частині турбіни. У різних каналах системи охолодження властивості повітря, і зокрема, його щільність значно відрізняються. Внаслідок цього розрахунок системи охолодження, реалізований в програмному комплексі ТНА, відбувається за допомогою трьох вкладених циклів. Цикл нижнього (першого) рівня припускає знаходження витрат повітря в каналах і повних тисків у вузлових точках при заморожених значеннях коефіцієнтів гідравлічного опору в елементах мережі. При цьому витрати повітря знаходяться

шляхом обходу лінійно незалежних контурів гідравлічної схеми відповідно за ітераційним процесом Андріяшева

$$\sum_{j=1}^k (-r_j G_j^2 \text{sign}(G_j) + H_j \text{sign}(H_j)) = 0, \quad (1)$$

де k - число гілок в контурі, H_j , r_j , - відповідно напір і наведене гідравлічний опір в j -му елементі контуру.

В циклі другого рівня уточнюються гідравлічні опори і напори за отриманими на першому рівні витратами повітря, його тиску і температурі в усіх гілках мережі.

В циклі третього рівня встановлюється теплова взаємодія між гідравлічною моделлю системи охолодження і тепловою моделлю охолоджуваного об'єкта. На цьому етапі відбувається обмін граничними умовами, а саме: гідравлічна модель поставляє тепловій відсутні граничні умови третього роду для границь моделі, відповідним каналам системи охолодження, а теплова модель після визначення температурного поля об'єкта повертає температури границь, тобто середні температури поверхонь каналів.

Зазвичай процес проектування систем охолодження газових турбін відбувається в діалоговому режимі і займає досить багато часу. Тому є доцільним впровадження комп'ютерної оптимізації систем охолодження. Відзначено, що при розв'язанні складних багатокритеріальних оптимізаційних завдань з великою кількістю варійованих параметрів, функціональних і параметричних обмежень, якими є розгалужені системи охолодження газових турбін, найбільш підходить ЛП-пошук, заснований на систематичному перегляді багатовимірною простору параметрів за допомогою пробних точок, в якості яких використовуються точки ЛПт-послідовностей, які є найбільш рівномірно розподіленими серед усіх відомих у даний час послідовностей.

Запропоновано, що при оптимізації мінімізується загальна витрата повітря або витрати повітря в деяких гілках, через які відбуваються витоки повітря в проточну частину турбіни. У загальному випадку цільовою функцією є згортка, складена з витрат з деякими ваговими коефіцієнтами. В якості функціональних обмежень в обраних каналах задані межі допустимих витрат повітря, коефіцієнтів тепловіддачі або межі допустимих значень температури на ділянках лопатки.

Наведено методи розрахунку розгалужених гідравлічних схем (гідравлічна математична модель) і температурних полів (теплова математична модель), які лягли в основу розробленого програмного комплексу ТНА (Thermal Hydraulic Analysis) (А.И. Тарасов, А.И. Долгов – Свідоцтво про офіційну реєстрацію програм для ЕОМ №2007610141, 10 листопада 2006. - Федеральна служба з інтелектуальної власності, патентам і товарним знакам, Росія). Методи модифіковані таким чином, щоб комплекс ТНА дозволяв створювати системи охолодження як окремих частин ГТУ, так і ГТД в цілому. Розрахунок теплопровідності часто виконується методом кінцевих елементів у двовимірній постановці (плоскій і вісесиметричній). Однак елементи турбіни є зазвичай тривимірні як з

точки зору їх геометрії, так і внаслідок змінності граничних умов на їх поверхні. Тому в роботі розроблений і обґрунтований підхід, що дозволяє звести тривимірну задачу теплопровідності до двовірної за рахунок еквівалентної заміни дискретних джерел теплоти рівномірно розподіленими.

У третьому розділі виконано чисельний аналіз тепловіддачі в найбільш важливих типах каналів охолодження, отримані уточнені залежності, обґрунтовано їх використання для розрахунку тепловіддачі в каналах охолодження газових турбін.

Оптимізація систем охолодження є дійсно продуктивною тільки в тому випадку, коли компоненти гідравлічної мережі модулюються з достатнім ступенем точності. Система охолодження сучасної газової турбіни містить досить велику кількість різних компонентів (каналів системи охолодження або гілок), течія в яких є досить складною і значно відрізняється від одновимірної. Найбільш часто використовуються канали з круглим і прямокутним поперечними перерізами, аналіз теплообміну і гідравлічного опору в яких неодноразово виконувався багатьма дослідниками. Однак навіть у простих випадках задача розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі і опору в каналах охолодження не є настільки очевидною, як це зазвичай вважається. У зв'язку з цим виконаний чисельний аналіз теплообміну в найбільш відповідальних каналах систем охолодження лопаток газових турбін. За результатами чисельного аналізу дані рекомендації про використання критеріальних співвідношень тепловіддачі в умовах характерних для роботи газових турбін. Досліджена тепловіддача у круглому і прямокутному каналах, в каналах з поперечними ребрами при великих температурних напорах, тепловіддача при струменевому натіканні повітря на вхідну кромку лопатки, в каналах з поворотом потоку на 180° , а також при перехідному режимі течії.

Однією з найбільш важливих задач, яку вдалося вирішити, є вплив на тепловіддачу залежності теплофізичних властивостей повітря. Застосування температурного фактора у критеріальних співвідношеннях зменшує коефіцієнт тепловіддачі і підвищує температуру металу. Наприклад, для напрямної лопатки газової турбіни він може підвищити температуру поверхні лопатки приблизно на $30 \dots 50^\circ\text{C}$. Неоднаковість використання температурного фактора в різних каналах охолодження спонукала виконати аналіз теплообміну в них для встановлення єдиного підходу.

На першому етапі виконувався 3D CFD аналіз течії і теплообміну в круглому каналі діаметром 2 мм. В якості моделі турбулентності використовувалася модель Спаларта-Аллмараса, яка показала відповідну верифікацію з експериментальними даними по теплообміну в трубі при малих температурних напорах. На вході в трубу задавалася однакова для всіх розрахунків температура 573 K , температура стінки залишалася постійною по довжині труби і змінювалася для кожного з розрахунків. Число Re підтримувалося поблизу 10000, що гарантувало турбулентний режим. По результатах чисельного аналізу визначався розподіл значення щільності теплового потоку $q(x)$ у вздовж каналу, а сере-

дньовитратна температура повітря і локальні значення коефіцієнту тепловіддачі знаходились за формулами:

$$T_p(x) = T_{p,x=0} + \frac{\pi \cdot d}{C_p} \int_0^x q(x) dx, \quad (2)$$

$$\alpha(x) = \frac{q(x)}{T_c - T_p(x)}, \quad (3)$$

де T_c , T_p – температури стінки і середньовитратна температура повітря (рідини). Середній по довжині труби коефіцієнт тепловіддачі знаходився за формулою

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{x} \int_0^x \alpha(x) dx. \quad (4)$$

Встановлено, що при великих температурних напорах теплова стабілізація, навіть при значних відстанях від входу в трубу не настає і коефіцієнт тепловіддачі продовжує зростати після очікуваного зниження на початковій ділянці (рис. 1). Це зростання зумовлене зміною теплофізичних властивостей повітря. В той же час критерій Nu приймає постійне значення на тих ділянках, де тепловіддача продовжує збільшуватися.

Встановлено, що локальне значення коефіцієнта тепловіддачі відповідно до чисельного експерименту достатньо точно визначається критеріальними співвідношеннями:

$$Nu_{p,d} = 0,024 \cdot Re_{p,d}^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \left(\frac{T_p}{T_c} \right)^{0,45} \varepsilon, \quad (5)$$

$$\varepsilon = 1,38 \left(\frac{x}{d} \right)^{-0,12}, \quad \frac{x}{d} \leq 15, \quad (6)$$

$$\varepsilon = 1, \quad \frac{x}{d} > 15.$$

У критерії Re використовувалася середня по перерізу труби швидкість у кожному перерізу у вздовж труби.

Залежність (5) досить близька до залежності для середньої тепловіддачі в трубі

$$Nu_{p,d} = 0,023 \cdot Re_{p,d}^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \left(\frac{T_p}{T_c} \right)^{0,55}, \quad (7)$$

запропонованої в довіднику по теплопередачі С.С. Кутателадзе і В.М. Боришанського. Деякі відмінності показника степеня при температурному факторі і постійному співмножнику можна вважати досить прийнятними, якщо враховувати невизначеності, які вносяться в розрахунок моделлю турбулентності.

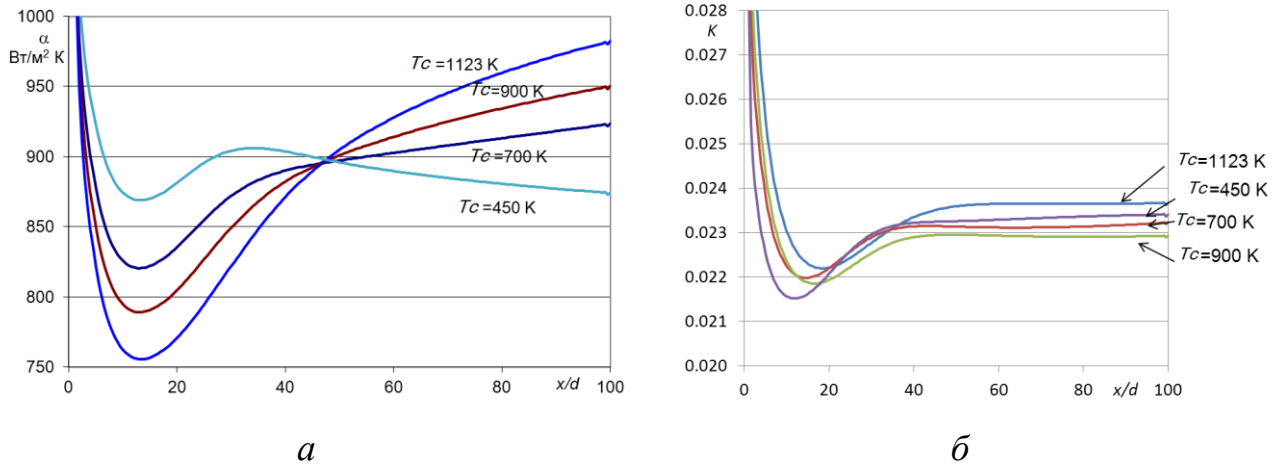


Рисунок 1 – Тепловіддача в круглому каналі в залежності від температури стінки. *a* – коефіцієнт тепловіддачі, *б* – $K = Nu/Re^{0,8} Pr^{0,4}$

Враховуючи, що в системах охолодження використовуються короткі канали з різними турбулізаторами, запропоновано два припущення:

1. Причина зниження тепловіддачі при великих температурних напорах однакова, тому слід ввести температурний фактор для всіх типів каналів систем охолодження газових турбін;

2. Температурний фактор не робить істотного впливу на тепловіддачу в каналах з турбулізаторами у зв'язку з перемішуванням потоку в пристінкових зонах і вирівнюванням властивостей газу в поперечних перерізах каналів.

Проведено чисельний аналіз тепловіддачі для двох найбільш характерних каналів охолодження: круглого каналу з поперечно розташованими ребрами і каналу квадратного перерізу з поворото потоку на 180° . Встановлено, що в обох випадках температурний напір не впливає на тепловіддачу в області, де відбувається активне перемішування.

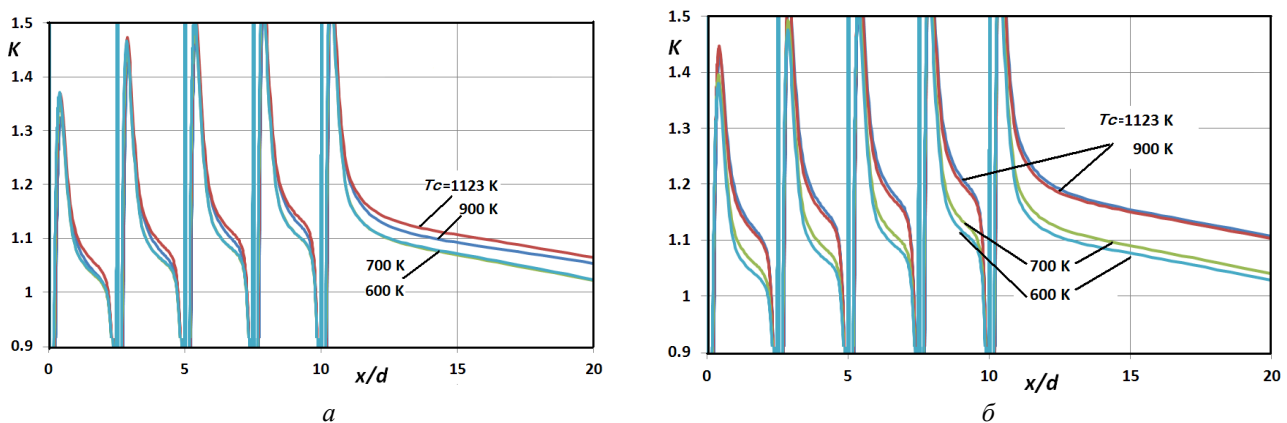


Рисунок 2 – *CFD* моделювання тепловіддачі в трубі на ділянці з поперечними ребрами з використанням моделі турбулентності Спалларта-Алмариса: *a* – нормування критерію Nu виконано при $A = 0,024$ і $n = 0$, тобто без урахування температурного фактора; *б* – при $A = 0,024$ та $n = 0,35$, тобто з урахуванням температурного фактора

На рис. 2 по осі ординат відкладений коефіцієнт інтенсифікації теплообміну

$$K = \frac{\text{Nu}_{p,d}}{\text{ARe}_{p,d}^{0,8} \text{Pr}_p^{0,4} \left(\frac{T_p}{T_c} \right)^n} \quad (8)$$

в трубі з внутрішнім оребренням. Розрахункова модель круглого каналу системи охолодження містила п'ять ребер. Перед оребреною ділянкою розташовувалася адіабатична ділянка гідродинамічної стабілізації ($l/d=50$). За кожним з ребер відбувається різке збільшення тепловіддачі, а потім її зниження при наближенні до наступного ребра. На рис. 2б нормування виконано з урахуванням температурного фактора ($n = 0,35$), що призвело до розшарування кривих інтенсифікації тепловіддачі на ділянках між ребрами. На рис. 2а температурний фактор в (8) не використовувався ($n = 0$) і всі криві коефіцієнта інтенсифікації, відповідні різним значенням температурного напору, практично злилися в єдину криву, що свідчило про відсутність помітного впливу на тепловіддачу температурного напору.

Аналогічні результати отримані і при аналізі теплообміну в квадратному каналі з поворотом потоку на 180° (рис. 3). На ділянці прямого ходу, тобто до повороту потоку криві коефіцієнта інтенсифікації тепловіддачі для різних температурних напорів розшаровуються, якщо в нормуванні (8) не враховувати температурний фактор, а на ділянці після повороту всі криві зливаються в єдину криву (рис. 4а). Якщо враховувати температурний фактор (рис. 4б), то криві інтенсифікації на ділянці прямого ходу зливаються в одну криву, а на ділянці зворотного ходу розшаровуються. Таким чином, у разі перемішування потоку поперечними ребрами або поворотом потоку температурний фактор не повинен бути застосованим у критеріальному співвідношенні тепловіддачі.

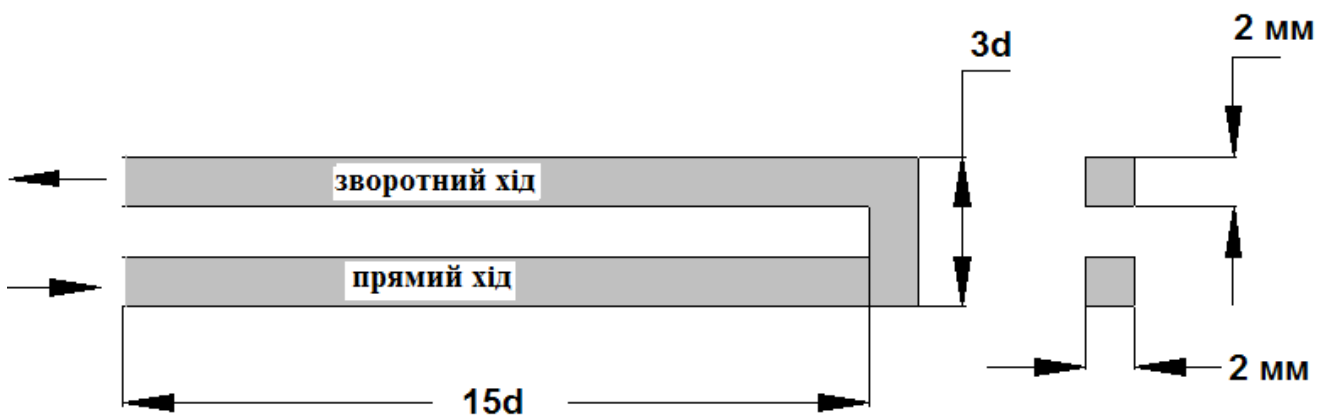


Рисунок 3 – Розрахункова область каналу квадратного перерізу з поворотом потоку на 180°

Досліджено поворот потоку, який має місце досить часто в системах охолодження робочих лопаток. Отримано достатньо прийнятний збіг результатів чисельного розрахунку з експериментом з тепловіддачі. Обґрунтовано викорис-

тання критеріальних рівнянь теплообміну для розрахунку тепловіддачі в каналах охолодження з поворотом потоку в умовах, які характерні для роботи газових турбін.

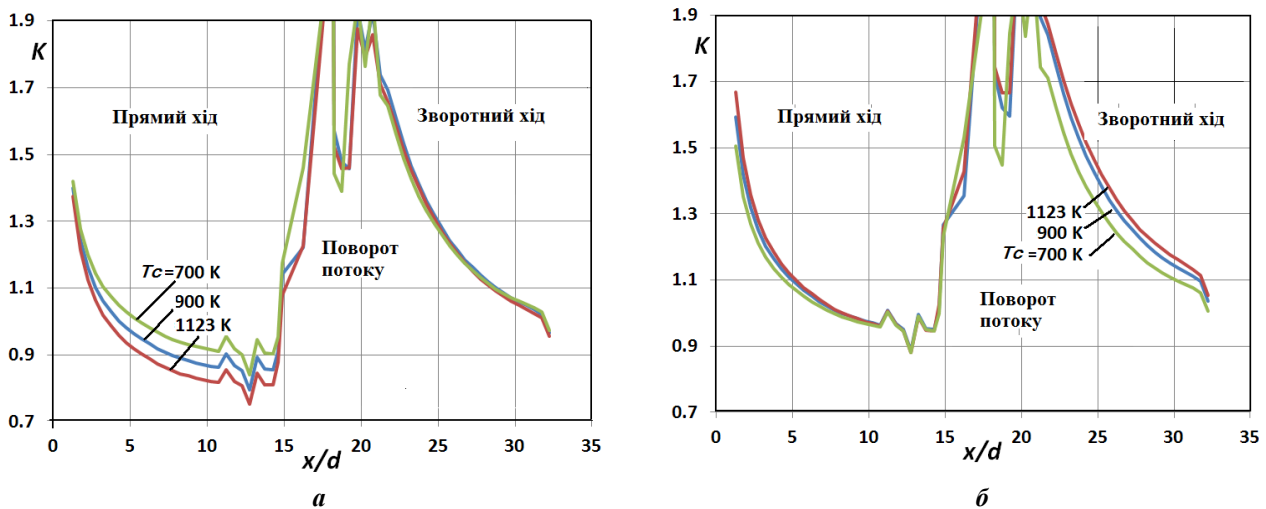


Рисунок 4 – *CFD* моделювання тепловіддачі в квадратному каналі з поворотом на 180° і з використанням моделі турбулентності Спалларта-Алмариса: *a* – нормування Nu виконано при $A = 0,021$ та $n = 0$, тобто без урахування температурного фактора; *b* – при $A = 0,021$ и $n = 0,30$, тобто з урахуванням температурного фактора

Тепловіддача в плоскому каналі при турбулентному режимі визначається зазвичай по залежностям для круглого каналу з використанням гідравлічного діаметра. Однак в кутових зонах плоского каналу спостерігається помітне зниження тепловіддачі внаслідок зниження швидкості. Внаслідок цього, як показав проведений *CFD* аналіз, тепловіддача знижується, що враховано поправкою:

$$\varepsilon_{bh} = 0,0327 \frac{b}{h} + 0,8362, \quad 1 \leq \frac{b}{h} \leq 5, \quad (9)$$

де b , h – відповідно ширина і висота каналу. При $b/h = 5$ поправка дорівнює одиниці. При менших b/h поправка зменшує коефіцієнт тепловіддачі в порівнянні з круглим каналом. При $b=h$ це зменшення становить 13%.

В напрямних лопатках часто використовують струмені повітря для охолодження вхідної кромки, на внутрішній поверхні якої розміщуються ребра. У зв'язку з цим виконаний *CFD* аналіз перебігу та теплообміну в порожнині лопатки (рис. 5, 6). Розмір моделі та умови течії задавалися характерними для лопаток газових турбін. Встановлено, що струмені безперешкодно вдаряються об внутрішню поверхню лопатки між ребрами, і коефіцієнт тепловіддачі на орбреній поверхні такий самий, як і на гладкій. Тому зроблено висновок, що наявні критеріальні співвідношення для тепловіддачі справедливі і для випадку орбреної стінки.

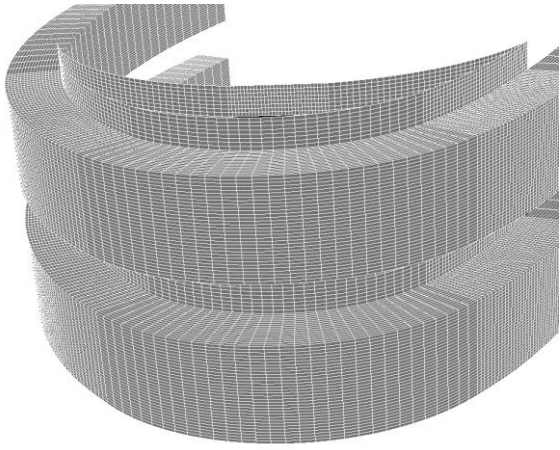


Рисунок 5 – Модель розрахункової області порожнини охолодження в області ребреної вхідної кромки

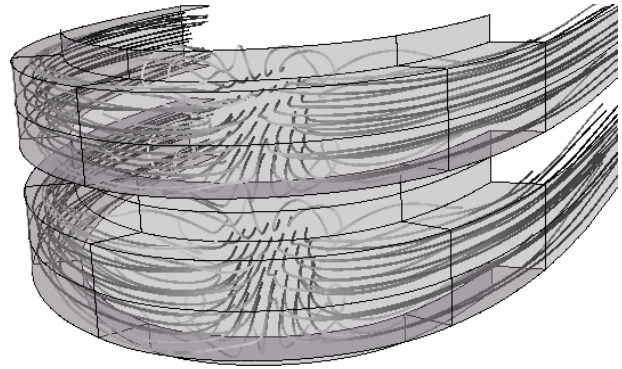


Рисунок 6 – Лінії струму в області вхідної кромки

У четвертому розділі проведено верифікацію оптимізаційної моделі розрахунків систем охолодження з використанням програмного комплексу ТНА для робочих і напрямних лопаток газових турбін.

Завданням оптимізації для направляючої лопатки енергетичної газової турбіни з дефлекторною системою охолодження (рис. 7) є мінімізація витрати повітря при обмеженні на нерівномірність температури поверхні лопатки в $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, і обмеженні на максимальну температуру поверхні лопатки $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

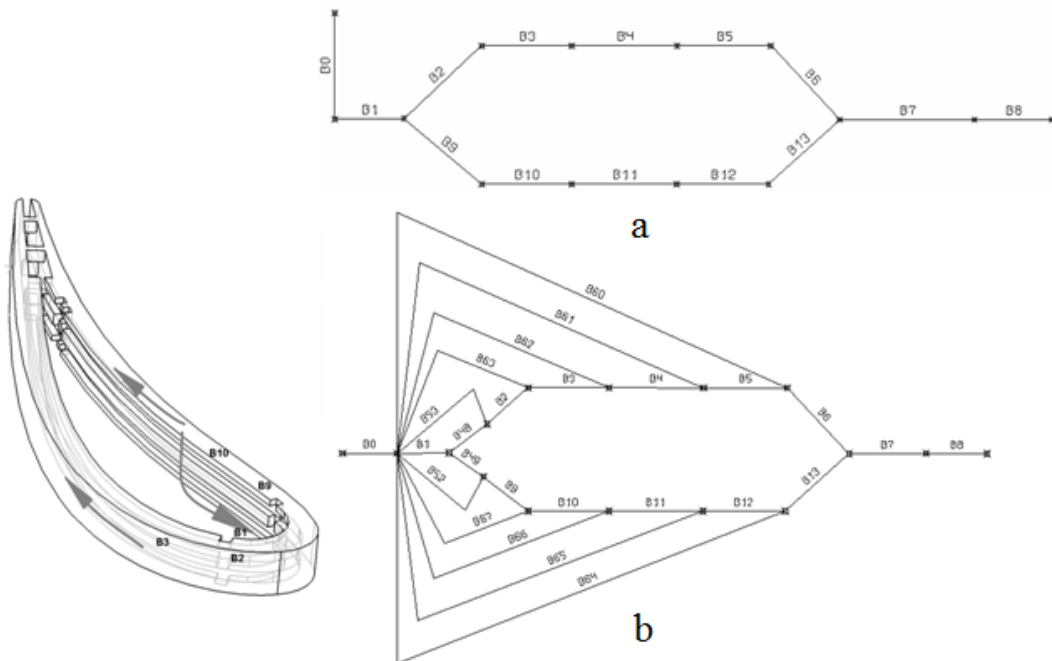


Рисунок 7 – Конструкція системи охолодження направляючої лопатки дефлекторного типу та схема її системи охолодження (дефлектор не показаний). а – первинний варіант, б – схема з подачею повітря в порожнину між дефлектором і стінкою лопатки

Для вирівнювання температури лопатки передбачено подання повітря через отвори в дефлекторі не тільки в області вхідної кромки, але і по периметру дефлектора. Така схема має сильну чутливість по відношенню до діаметрів отворів в дефлекторі. Тому завдання вирішене шляхом використання блоку оптимізації в ТНА. В якості варійованих параметрів використовувалося 10 рядів отворів в дефлекторі в основній частині профілю і один ряд в області вхідної кромки. На рис. 8 наведено розподіл температури поверхні лопатки для двох варіантів (первинного і оптимізованого) системи охолодження. Таким чином, в оптимізованому варіанті системи охолодження, зі зменшенням витрат на 10 г/с вдалося знизити перепад температури до 53 °С, особливо в області вхідної кромки, і обмежити температуру поверхні лопатки температурою 849 °С.

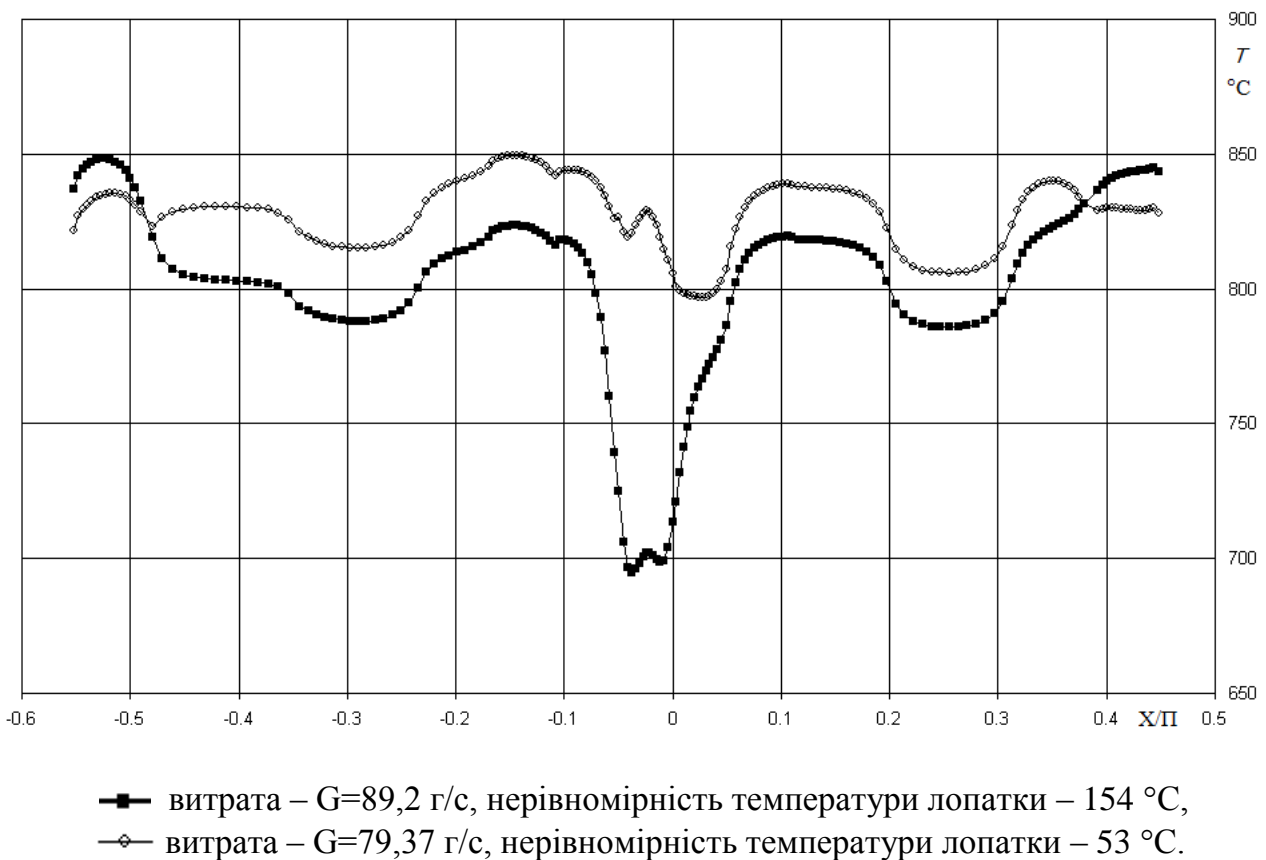


Рисунок 8 – Розподіл температури стінки в первинному ($G=89,2$ г/с) і оптимізованому варіанті ($G=79,4$ г/с) уздовж увігнутої (праворуч) і опуклої (ліворуч) поверхонь лопатки

Оптимізація петельної системи охолодження робочої лопатки (рис. 9) виконувалася в два етапи. На першому етапі оптимізації використовувався тільки гідравлічний модуль ТНА, в якому температурне поле лопатки розраховувалося в одновимірній постановці по залежностях для плоскої стінки. На другому етапі оптимізація виконувалася в сполученій постановці, яка використовувала як початковий варіант результати першого етапу. В якості варійованих задавалися наступні параметри: діаметр стовпчиків-турбулізаторів і крок їх розміщення, крок ребер у вихровій матриці, висоти поперечних ребер у радіальних каналах,

діаметри підвідних каналів. Загальна кількість варійованих параметрів досягала п'ятдесяти значень (рис. 10).

Успіх оптимізації системи охолодження за критерієм мінімізації витрати повітря в значній мірі залежить від того, яким чином задані діапазони зміни кожного з варійованих параметрів. У загальному випадку діапазони задаються з урахуванням геометричних обмежень, тобто виходячи з можливості розміщення турбулізаторів в каналах з урахуванням обмеження мінімальних значень кроків між турбулізаторами, ребрами, що не призводять до повного перегороджування живого перерізу каналів. При такому підході, тобто коли варіювання значеннями параметрів відбувається в можливих з точки зору виготовлення межах, комп'ютерна оптимізація відповідає на питання про придатність обраної схеми для охолодження.

Досвід показує, що із загальної кількості варіантів розрахунків системи охолодження тільки невелика їх кількість задовольняє обраним обмеженням. Так в даному випадку з 20000 варіантів тільки кілька десятків задовольняли температурі поверхні в заданому діапазоні (760-850) °С. Серед цих варіантів найменша витрата, що дорівнює 131,6 г/с, відповідала варіанту 15262 (рис. 11).

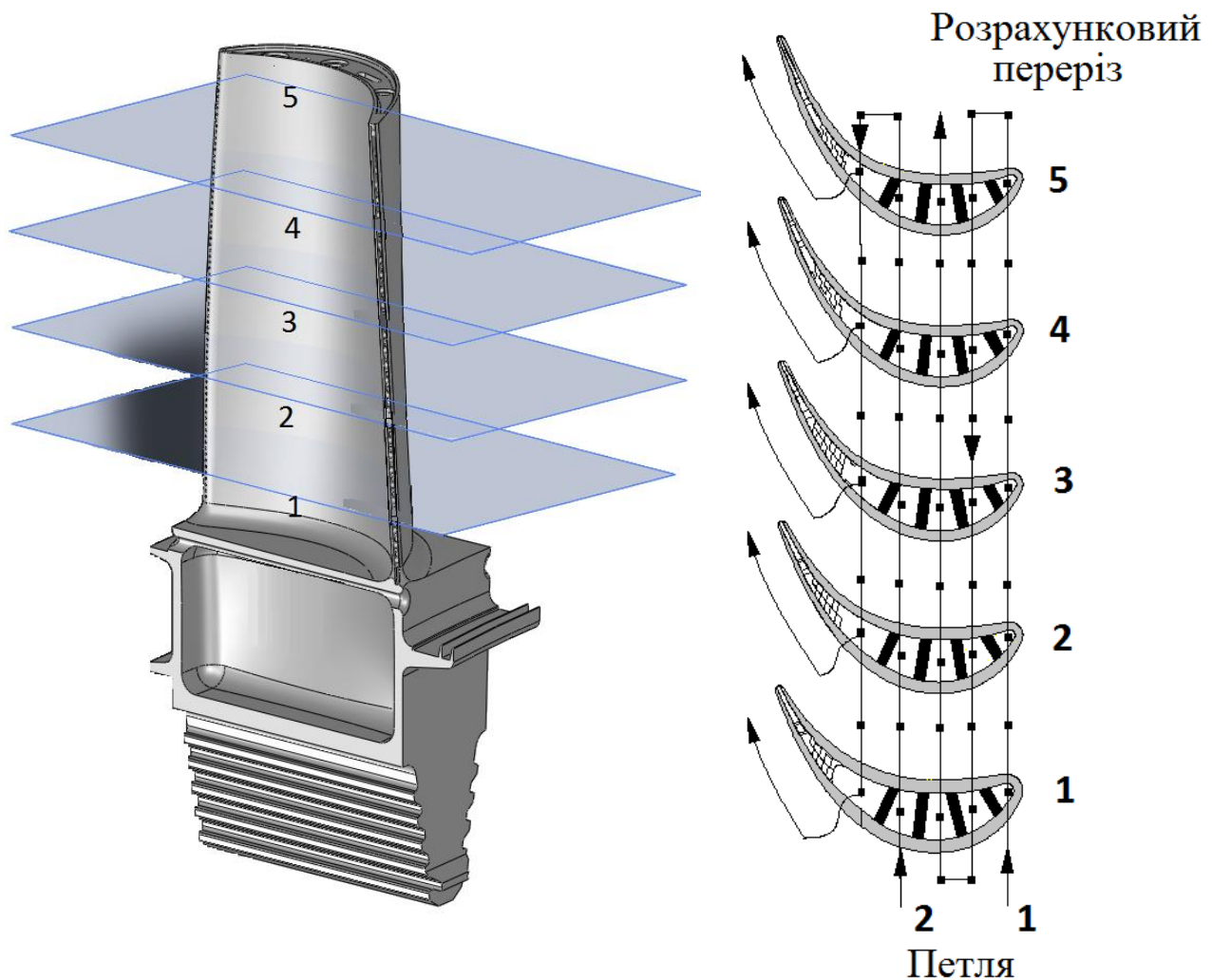


Рисунок 9 – Робоча лопатка з петельною системою охолодження

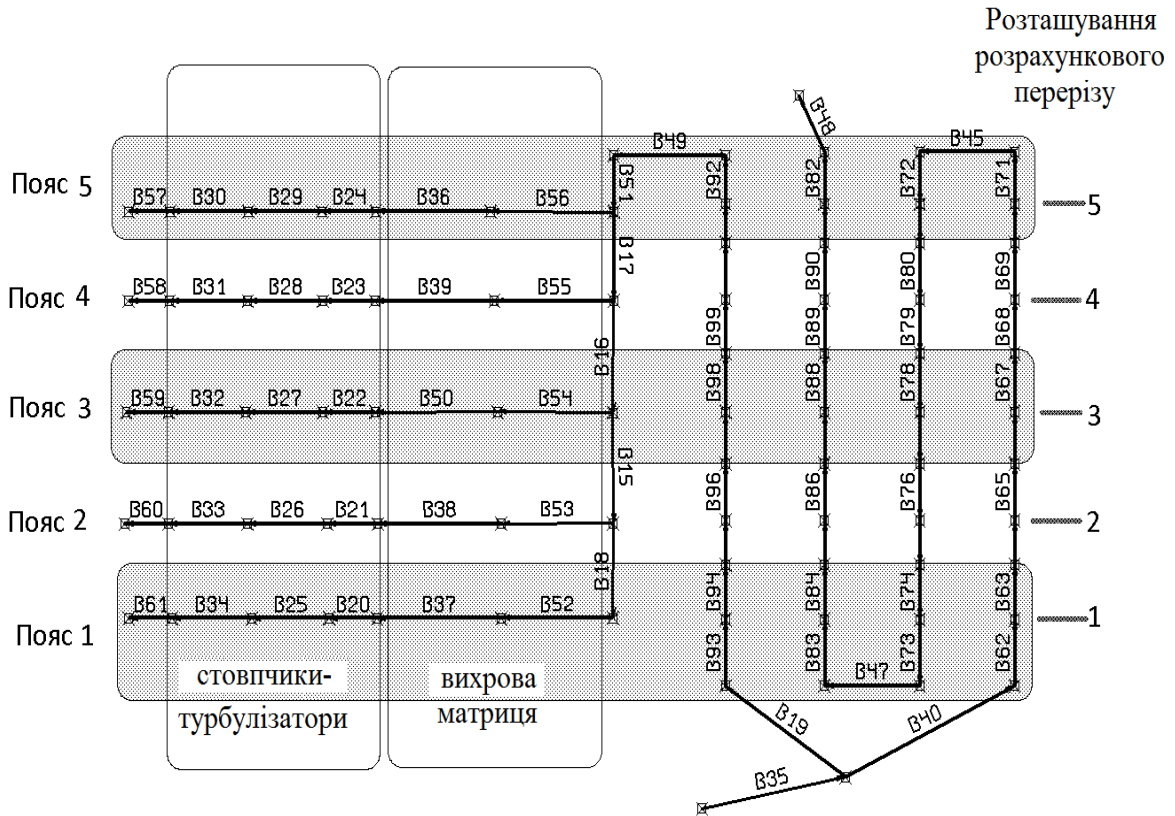


Рисунок 10 – Канали системи охолодження робочої лопатки, де відбувалося варіювання параметрами

Optimization

Case Study					
#	Branch	Item	min	max	Result
1	b29	Transverse Pitch, s2	2.780005	2.780005	2.719430
2	b28	Transverse Pitch, s2	3.487487	3.487487	3.561203
3	b27	Transverse Pitch, s2	2.503296	2.503296	2.515185
4	b33, b60	Transverse Pitch, s2	4.090516	4.090516	4.124478
5	b72, b81	Fin Height	1.193405	1.193405	1.265885
6	b80, b79	Fin Height	1.719052	1.719052	1.807246
7	b78, b77	Fin Height	2.686446	2.686446	2.418829
8	b76, b75	Fin Height	1.364733	1.364733	1.339726
9	b85, b86	Fin Height	1.924597	1.924597	1.792775
10	b87, b88	Fin Height	2.010791	2.010791	1.846945
11	b89, b90	Fin Height	1.482707	1.482707	1.473754

Apply for all cases
 %

 %

Global Criterion			
#	Branch	Weight	Flow rate
1	b35	1.000000	131.563173

For all ME

Thermal Restriction						
#	ME name	edge #	options	T min	T max	Result
1	m12	Edge #2	Maximum	790.000000	860.000000	810.7604
2	m17	Edge #2	Maximum	790.000000	860.000000	836.2436
3	m44	Edge #2	Maximum	790.000000	860.000000	799.5900
4	m49	Edge #2	Maximum	790.000000	860.000000	838.5420

Hydraulic Restriction					
#	Branch	Restriction	min	max	result

Рисунок 11 – Вид діалогового екрану з результатами кращого варіанту оптимізації

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу обґрунтування оптимізаційної теплогідравлічної моделі розрахунків системи охолодження газових турбін. Отримали розвиток методи розрахунку теплового стану газових турбін, гідравлічних систем охолодження, застосування оптимізації, уточнення залежностей для тепловіддачі у каналах охолодження. Усі розроблені і удосконалені методи реалізовані у відповідній комп'ютерній програмі.

За результатами дисертаційної роботи зроблені наступні висновки:

1. Адаптовано метод оптимізації конструкції систем охолодження, створено модуль оптимізації, який вбудовано в програму розрахунку системи охолодження газових турбін. Доведена доцільність застосування програми для розробки ефективних конструкцій системи охолодження лопаток газових турбін, що є підґрунтям для їх подальшого удосконалення.

2. Розроблено методику практичного втілення комп'ютерної оптимізації в процес проектування системи охолодження газових турбін, головною особливістю котрої є проведення оптимізації у два етапи: з орієнтовним визначенням температурного стану лопаток за допомогою одновимірної теорії теплопровідності та з розрахунком двовимірних температурних полів, що суттєво зменшує час на проведення оптимізації.

3. Підвищено надійність розрахунку системи охолодження сучасних газових турбін за рахунок застосування уточнених залежностей для тепловіддачі в каналах охолодження, які зменшують похибку розрахунку температури поверхні лопатки на 30 ...50 °С.

4. Удосконалені методи розрахунку систем охолодження за рахунок застосування 2D моделей теплопровідності для аналізу температурного стану тривимірних елементів газових турбін, що значно скорочує час на проведення розрахунків системи охолодження роторів з робочими лопатками та інших тривимірних елементів газових турбін.

5. За допомогою створених методів виконано оптимізацію конструкцій систем охолодження лопаток газових турбін, що дозволило скоротити витрату повітря для їх охолодження більш, чим на 10% порівняно з витратами у початкових конструкціях та довести температурні перепади поверхонь лопаток до 50 ... 100 °С.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджено на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв), ТОВ «ІК Актуальна механіка» (м. Харків) при проектуванні систем охолодження газових турбін та у навчальний процес кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ» (м. Харків).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Долгов А.И. Оптимизация системы охлаждения турбинной лопатки дефлекторного типа [Текст]/ А.И. Тарасов, А.И.Долгов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2008. – №.6. – С. 76–82.

Здобувачем проведено оптимізацію системи охолодження лопатки турбіни і виконано аналіз її результатів.

2. Долгов А.И. Анализ теплообмена при струйном охлаждении входной кромки лопатки газовой турбины [Текст]/ А.И. Тарасов, А.И. Долгов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2009. – №.3. –С. 122–127.
Здобувачем виконано чисельне дослідження тепловіддачі при струменевому охолодженні вхідної кромки лопатки турбіни, визначено рівняння подоби, що найбільшою мірою відображає тепловіддачу в цих умовах.
3. Долгов А.И. Стратегия оптимизации систем охлаждения лопаток газовой турбины методом LP-поиска применительно к сетевой модели [Текст] / А.И. Тарасов, А.И. Долгов // Электронное моделирование. - Киев: НАН Украины. - 2010. - №1.– т. 32.–С. 105-112.
Здобувачем запропоновано використовувати для оптимізації систем охолодження LP-пошук та розроблено алгоритм його використання.
4. Долгов А.И. Проектирование систем охлаждения газовых турбин [Текст] / А.И. Тарасов, А.И. Долгов // Турбины и Дизели: - Специализированный информационно технический журнал. – Пермь. –2010.–№3.– С. 14-16.
Здобувачем виконано аналіз систем охолодження лопаток і корпусу енергетичної газової турбіни і запропонований прийом, що дозволяє спростити розрахунок при збереженні його точності.
5. Долгов А.И. Влияние подогрева теплоносителя на теплоотдачу в каналах систем охлаждения [Текст] / А.И. Тарасов, Е.П. Авдеева, А.И. Долгов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ».» – 2011. – №.6. С. 28-33.
Здобувач запропонував спосіб обробки результатів чисельного моделювання процесу теплообміну в круглих каналах, що дозволило обґрунтувати вплив великих температурних напорів на тепловіддачу.
6. Долгов А.И. Применение 2D моделей теплопроводности для расчета температуры охлаждаемых деталей газовых турбин [Текст] /А.И. Тарасов, О.О. Литвиненко, А.И. Долгов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2012. – №.8.–С. 36-41.
Здобувач виконав розрахунки, які дозволили довести можливість використання двовимірного підходу для аналізу тривимірних температурних полів.
7. Долгов А.И. Оптимизация системы охлаждения рабочей лопатки энергетической газовой турбины [Текст] / А.И. Тарасов, А.И. Долгов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2013. – №.12 (986) С. 69-76
Здобувач розробив методику проведення оптимізації систем охолодження лопаток газових турбін з застосування програми ТНА.
8. Долгов А.И. Об учете температурного фактора в расчетах охлаждения газовых турбин [Текст]/ А.И. Тарасов, А.И. Долгов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2014. – №.11 (1054) С. 72-81
Здобувач виконав CFD-аналіз теплообміну в каналах систем охолодження газових турбін, зробив висновки у яких випадках необхідно брати до уваги температурний фактор.

9. Долгов А.И. ТНА (Thermal & Hydraulic Analysis)/ А.И. Тарасов, А.И. Долгов // Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2006613871.–Российская федерация, Заявка №2006613693, дата поступления 2.10.2006, зарегистрировано 10.10.2006.
Здобувачем розроблені окремі модулі розрахунку гідравлічної мережі, модуль оптимізації, інтерфейс програми.
10. Долгов А.И. НТТС (Heat Transfer Coefficient Calculator) / А.И. Тарасов, А.И. Долгов // Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2007610141.–Российская федерация, Заявка №2006613778, дата поступления 10.10.2006, зарегистрировано 9.01.2007.
Здобувачем виконано аналіз існуючих методів розрахунку тепловіддачі в проточних частинах газових турбін, визначений набір розрахункових залежностей для тепловіддачі, розроблений інтерфейс програми.
11. Долгов А.И. Совершенствование методов расчета и оптимальное проектирование систем охлаждения газовых турбин [Текст]/ А.И. Тарасов, А.И. Долгов, Чан Конг Шанг// Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели: сб. тезисов докладов XIII Всероссийской Межвузовской научно-технической конференции (Москва, 29–31 октября 2008 г.) /МГТУ им. Н.Э.Баумана.–М.:2008.– С. 92–94.
Здобувачем запропоновано вдосконалення розрахунку гідравлічної схеми охолодження, що суттєво вплинуло на точність результатів.
12. Долгов А.И. Оптимизация систем охлаждения лопаток газовой турбины методом ЛП–поиска [Текст] / А.И. Тарасов, А.И. Долгов // Моделирование 2008: Сб. трудов конференции (Киев, 14-16 мая 2008) / Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г.Е.Пухова НАН Украины.–К., ИПМЭ. - 2008.–С.350–357.
Здобувачем визначені варійовані параметри гідравлічної мережі системи охолодження лопатки, проведена її оптимізація, зроблено аналіз результатів оптимізації.
13. Долгов А.И. К вопросу об оптимизации систем охлаждения газовых турбин [Текст] /А.И. Долгов // Технологический аудит и резервы производства. Спецвыпуск. Матеріали Міжнародної наукової конференції «Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації: матеріали міжнародної наукової конференції (Київ 2012 р.) / том. Енергетика та енергозощадження. Транспортні технології. Частина 1. – Київ, 2012. – №5/1 (7). – С. 7-8.
Здобувач виклав основні принципи оптимізації систем охолодження газових турбін.
14. Долгов О.І. Використання програмного комплексу розрахунку систем охолодження [Текст] / О.І.Тарасов, О.І.Долгов // Промислова гідравліка і пневматика в суміжних галузях промисловості: матеріали конференції Асоціації спеціалістів промислової гідравліки і пневматики, Таврійського національного агротехнологічного університету, Національного авіаційного університету (м. Мелітополь 17 - 19 вересня 2014 р.) / Таврійський національний агротехнологічний університет,–Мелітополь.:2014.–С.114.

АНОТАЦІЇ

Долгов О.І. Термогідрравлічне обґрунтування оптимізаційної моделі розрахунків системи охолодження газових турбін. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.16 – турбомашини і турбоустановки. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2015.

Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної задачі обґрунтування оптимізаційної теплогідрравлічної моделі розрахунків системи охолодження газових турбін.

Створено математичну модель для оптимізації систем охолодження газових турбін та відповідну комп'ютерну програму. Для визначення цільової функції застосовано математичну модель системи охолодження, яка базується на двох моделях: моделі гідрравлічної мережі та моделі теплопровідності для деталей газової турбіни. Ієрархію моделей завершує модель оптимізації, яка базується на використанні ЛПт-последовностей. При оптимізації мінімізується загальна витрата повітря або витрати повітря в деяких гілках системи охолодження. В якості функціональних обмежень в обраних каналах задаються межі допустимих значень температури на ділянках лопатки.

Виконано чисельний аналіз тепловіддачі в найбільш важливих типах каналів охолодження, отримані уточнені залежності, обґрунтовано їх використання для визначення тепловіддачі в умовах роботи газових турбін. Отримані відповідні рівняння подібності для тепловіддачі в цих каналах.

Створені оптимальні системи охолодження напрямної і робочих лопаток газової турбіни. Розроблено послідовність дій, які крок за кроком дозволяють оптимізувати систему охолодження лопаток газової турбіни.

Ключові слова: газова турбіна, лопатка, система охолодження, теплообмін, коефіцієнт тепловіддачі, тепловий стан, оптимізація.

Долгов А.И. Теплогидравлическое обоснование оптимизационной модели расчетов системы охлаждения газовых турбин. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – турбомашини и турбоустановки. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2015.

Диссертация посвящена решению научно-практической задачи обоснования оптимизационной теплогидравлической модели расчетов системы охлаждения газовых турбин.

Обоснование было осуществлено путем дальнейшего развития методов расчета теплового состояния газовых турбин, гидравлических систем охлаждения, методов оптимизации, уточнения зависимостей для теплоотдачи в каналах охлаждения. Все разработанные и усовершенствованные методы внедрены в соответствующие компьютерные программы, которые могут быть использованы для создания надежных и эффективных систем охлаждения лопаток газовых турбин.

Создана математическая модель для оптимизации систем охлаждения газовых турбин и соответствующая компьютерная программа. Для определения целевой функции применена математическая модель системы охлаждения, которая базируется на двух моделях: модели гидравлической сети и модели теплопроводности для деталей газовых турбин. Обе модели функционируют последовательно с обменом информацией на каждой итерации, что позволяет получить параметры охладителя и температурное поле турбины с учетом их взаимодействия. Иерархию моделей завершает модель оптимизации, основанная на использовании ЛПт-последовательностей. Обосновано использование этих наиболее равномерно распределенных последовательностей для оптимизации систем с большим количеством варьируемых параметров, функциональных и параметрических ограничений, которыми являются разветвленные системы охлаждения газовых турбин. При оптимизации минимизируется общий расход воздуха или расходы воздуха в некоторых ветвях системы охлаждения заданной топологии. В качестве функциональных ограничений в избранных каналах задаются диапазоны допустимых изменений температуры на участках лопатки. Варьируемыми параметрами являются геометрические характеристики каналов охлаждения.

Разработана методика проектирования оптимальных систем охлаждения лопаток газовых турбин, которая предполагает оптимизацию выбранной схемы охлаждения за два основных этапа. На первом этапе оптимизируется гидравлическая схема охлаждения с использованием в качестве ограничений температуры отдельных участков лопаток, найденных с помощью одномерной теории теплопроводности. На втором этапе используются результаты предварительной оптимизации, но температура лопаток рассчитывается в 2D постановке методом конечных элементов. Граничные условия от газа к лопатке определяются по принятым в турбиностроении методикам и не изменяются в процессе оптимизации. Для ускорения вычислительного процесса обоснована методика сведения трехмерных задач теплопроводности к двумерным задачам за счет использования эквивалентных внутренних источников теплоты. Применение этой методики позволило рассчитывать температурное состояние роторов совместно с узлами соединения лопаток с диском в осесимметричной постановке. Оценена погрешность расчета температур, обусловленная данным упрощением.

Выполнен численный анализ теплоотдачи в наиболее важных типах каналов охлаждения, получены уточненные уравнения подобия и обосновано их использование для определения теплоотдачи в условиях работы газовых турбин. В частности, исследована теплоотдача в каналах круглого и прямоугольного сечения, в каналах с поперечными ребрами малой высоты, в канале квадратного сечения с поворотом потока на 180° , при струйном натекании воздуха на орбренную с внутренней стороны входную кромку лопатки.

Показано, что учет температурного фактора в круглых и плоских каналах уменьшает теплоотдачу, что может привести к увеличению температуры поверхности лопатки на $30 \dots 50^\circ\text{C}$. Получены соответствующие уравнения подобия для теплоотдачи в этих каналах. Показано, в каких из каналов нужно учитывать температурный фактор. В каналах с принудительной турбулизацией по-

тока воздуха температурный напор не влияет на теплоотдачу. Получена зависимость для канала прямоугольного сечения, которая учитывает снижение теплоотдачи в застойных угловых зонах. Показано, что при струйном охлаждении входной кромки лопатки ребра не вносят значительной погрешности в определение теплоотдачи по зависимостям, полученным для гладкой поверхности.

Создана оптимальная система охлаждения направляющей лопатки газовой турбины. Задачей оптимизации являлась минимизация расхода воздуха при ограничении на неравномерность температуры поверхности лопатки в 55 °С и ограничении на максимальную температуру поверхности лопатки 850 °С. Для выравнивания температуры направляющей лопатки предусмотрена подача воздуха через отверстия в дефлекторе, как в области входной кромки, так и по периметру дефлектора. Задача решена путем использования блока оптимизации в ТНА, в результате чего удалось снизить расход воздуха на 10 г/с на одну лопатку при соблюдении ограничивающих условий.

Выполнена оптимизация конструкции петлевой системы охлаждения рабочей лопатки энергетической газовой турбины. На первом этапе оптимизации использовался только гидравлический модуль ТНА, в котором температурное поле лопатки рассчитывалось в одномерной постановке по зависимостям для плоской стенки. На втором этапе оптимизация выполнялась в сопряженной постановке, которая использовала как начальное приближение результаты первого этапа. Общее количество варьируемых параметров в данном расчете достигало пятидесяти значений. Оказалось, что среди 20000 вариантов только несколько десятков удовлетворяет наложенным ограничениям, среди которых был найден вариант с минимальным расходом охлаждающего воздуха.

Ключевые слова: газовая турбина, лопатка, система охлаждения, теплообмен, коэффициент теплоотдачи, тепловое состояние, оптимизация.

Dolgov A.I. Thermohydraulic substantiation of the optimization model of the calculations of the gas turbines cooling system. Manuscript.

Thesis for degree of Candidate of Sciences in Technique for speciality 05.05.16 – turbomachine and turbine units. – National technical university «Kharkiv polytechnical institute», Kharkiv, 2015.

Thesis deals with the scientific and practical problem of thermal-hydraulic substantiation of the optimization model of the gas turbines cooling. Substantiation was carried out by the way of the further development of methods for the calculation of the thermal state of the gas turbine, hydraulic cooling systems, optimization methods, improvement of the heat transfer equations for the cooling channels.

Mathematical model for optimizing the cooling systems of gas turbines and the corresponding computer program was created. To determine the objective function was used a mathematical model of the cooling system, which is based on two models. Hierarchy of models completes by the optimization model based on the use of the LPt-sequences.

It was developed the numerical analysis of heat transfer in the most important types of cooling channels and was updated equation similarity, justified their use in a gas turbine.

It was create an optimal cooling system of the nozzle vane and blades of gas turbine blade. It was developed a series of actions that step by step allows you optimize the cooling system of gas turbine blades.

Keywords: gas turbine blade, cooling system, heat transfer, heat transfer coefficient, thermal state, optimization.