

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

МАКСЮТА ДМИТРО ІГОРОВИЧ



УДК 621.165

**КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД АЕРОДИНАМІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ
СТУПЕНЯ ОСЬОВОЇ ТУРБИНИ**

Спеціальність 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Бойко Анатолій Володимирович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри турбінобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Солодов Валерій Григорович,
Національний автомобільно-дорожній
університет, завідувач кафедри
теоретичної механіки та гідравліки

кандидат технічних наук
Бондаренко Герман Андрійович,
Сумський державний університет,
професор кафедри технічної теплофізики

Захист відбудеться « 30 » червня 2016 р. о 12⁰⁰ 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» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « ____ » травня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При модернізації парових турбін, в першу чергу ставиться задача підвищення функціональних показників їх проточних частин за рахунок використання аеродинамічно більш досконалого лопаткового апарату. Значні резерви для підвищення аеродинамічної ефективності містяться в застосуванні просторового профілювання лопаткового апарату враховуючи взаємний вплив соплової та робочої решітки.

Використання методів обчислювальної аеродинаміки (CFD) для моделювання фізичних явищ при протіканні робочого тіла в турбінному ступені дозволяє не лише ставити оптимізаційну задачу, а й отримати детальну картину процесу течії. Разом з тим оптимізація з використанням CFD потребує значних часових ресурсів для виконання розрахунків, що на практиці проявляється в обмеженні максимальної кількості параметрів, що варіюються.

Розробка комбінованого методу оптимізації ступеня осьової турбіни, заснованого на використанні одновимірної та тривимірної теорій, що дозволяє враховувати як характер течії робочого тіла в решітках, так і вплив на неї витоки в радіальний зазор, здатна суттєво поліпшити ефективність ступеня.

Таким чином, науково-практична задача розробки комбінованого методу просторової аеродинамічної оптимізації ступеня осьової турбіни з урахуванням конструктивних, режимних параметрів та функціональних обмежень є актуальною та визначила напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі турбінобудування НТУ «ХПІ» в рамках держбюджетної теми МОН України «Фундаментальні наукові дослідження проблем оптимізації термогазодинамічних процесів турбомашин в інтегрованому інформаційному просторі» (ДР № 0109U002389) і госпдоговірних робіт з ПАТ «Турбоатом» (м. Харків): «Багатопараметрична оптимізація конструктивних і термогазодинамічних параметрів проточної частини ЦВД турбіни К-220-44-2М АЕС «Ловііса» (Фінляндія) при виконанні модернізації», «Багатопараметрична оптимізація конструктивних і термогазодинамічних параметрів проточної частини турбіни ЦВТ К-225-12,8 виробництва ВАТ «Турбоатом», «Багатопараметрична оптимізація конструктивних і термогазодинамічних параметрів проточної частини ЦВТ турбіни К-540-23,5 при виконанні модернізації», «Визначення оптимальних геометричних параметрів проточної частини ЦНТ турбіни К-1250-6,9/25», в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка комбінованого методу аеродинамічної оптимізації ступеня осьової турбіни, який використовує одновимірні та тривимірні моделі розрахунку і дозволяє враховувати як характер течії робочого тіла в решітках, так і вплив на течію витоки, що має місце в ступені.

Для досягнення поставленої мети визначені завдання:

– провести поетапну верифікацію результатів розрахунків газодинамічних параметрів ступеня турбіни з результатами експериментальних досліджень;

- розробити комбінований алгоритм оптимізації ступеня осьової турбіни, який використовує одновимірні та тривимірні моделі розрахунку та дозволяє враховувати як характер течії робочого тіла в решітках, так і вплив на течію витоки, що має місце в ступені;

- апробувати методику визначення коефіцієнта витрати вісерадіального ущільнення в залежності від його геометричних і режимних характеристик і реалізувати її в єдиному інтегрованому інформаційному просторі САПР «Турбоагрегат»;

- провести дослідження аеродинамічної ефективності різних варіантів надбандажних ущільнень для виявлення перспективних конструкцій;

- за допомогою розробленого алгоритму провести оптимізацію лопаткового апарату натурального ступеня осьової турбіни, що працює на перегрітій водяній парі;

- за результатами комбінованої оптимізації провести аналіз фізичних причин, які сприяли підвищенню аеродинамічної ефективності ступеня турбіни.

Об'єкт дослідження – аеродинамічні процеси в ступені високого тиску осьової турбіни.

Предмет дослідження – комбінований метод оптимізації геометричних параметрів соплової та робочої лопаток ступеня високого тиску осьової турбіни.

Методи дослідження. Теоретичні аспекти роботи ґрунтуються на фундаментальних положеннях теорії гідрогазодинаміки. Оптимальна конструкція ступеня турбіни визначалася за допомогою методів планування експерименту з формальною макромоделлю підвищеної точності, точок ЛПт послідовностей та методу покоординатного спуску. Характеристики потоку в каналах турбіни розраховувалися з використанням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD), для побудови комп'ютерних моделей яких використовувалося твердотільне тривимірне комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблено комбінований метод аеродинамічної оптимізації ступеня осьової турбіни, який поєднує в собі одновимірну та тривимірну моделі газодинамічних процесів течії робочого тіла в ступені турбіни для ефективної організації обчислювального алгоритму;

- дістала подальшого розвитку методика вибору вхідного конструктивного кута робочого профіля, яка з урахуванням обертання робочого колеса та витоки в надбандажне ущільнення дозволяє мінімізувати втрати у робочій решітці;

- вперше для надбандажних вісерадіальних ущільнень з використанням CFD розрахунків розроблена методика розрахунку втрат від витоки з урахуванням впливу геометричних, режимних параметрів та температурного розширення.

Практичне значення одержаних результатів для галузі турбінобудування полягає у розробці комбінованого методу просторової оптимізації ступенів осьових турбін, який враховує як характер течії робочого тіла в решітках турбіни, так і вплив на течію витоки, яка має місце в ступенях, що в свою чергу дозволяє значно підвищувати ККД ступенів парових турбін. На основі розробленого методу проведена аеродинамічна оптимізація 3-го ступеня ЦВТ турбіни К-540-23,5, в результаті чого ККД нового ступеня збільшено більш ніж на 1 % в

абсолютних величинах зі збереженням витрати робочого тіла на рівні початкового ступеня. У перспективі визначені можливі схеми більш ефективних конструкцій прямоточних ущільнень, які дозволяють знизити витік робочого тіла в надбандажний зазор на 45 %.

Результати дисертаційної роботи використовуються ПАТ «Турбоатом» (м. Харків) при проектуванні і модернізації проточних частин циліндрів високого тиску турбін К-225-12,8, К-220-44-2М, К-540-23,5 (акт впровадження від 24 лютого 2016 р.).

Основні результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ» в курсах лекцій «Основи теорії оптимального проектування турбомашин», «Основи двох і тривимірної теорії оптимального проектування турбомашин», «Конструкції та міцність турбомашин» для студентів і магістрів, які навчаються за напрямками «Енергомашинобудування» і «Теплоенергетика» (акт впровадження від 17 лютого 2016 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі положення дисертації, винесені на захист, здобувачем розроблені і виконані особисто. Серед них: критичний аналіз шляхів підвищення ефективності ступеня осьової турбіни та визначення їх недоліків; аналіз сучасних підходів до розрахунку витіку в турбінних каналах; порівняння результатів розрахунків з результатами експериментальних досліджень ступеня турбіни; розробка комбінованого методу оптимізації ступеня осьової турбіни, який поєднує в собі одновимірний та тривимірний підходи до розрахунку течії в каналі турбіни; розробка та інтеграція у САПР «Турбоагрегат» методу розрахунку витіку в вісерадіальних надбандажних ущільненнях; розробка варіанту прямоточного надбандажного ущільнення, яке є аеродинамічно більш ефективним ніж початкове; проведення CFD розрахунків, їх обробка та аналіз; аеродинамічна оптимізація натурного ступеня ЦВТ турбіни К-540-23,5; пояснення причин значного росту ККД ступеня у процесі оптимізації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: XIX-XXIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2011-2015 рр.); VII-XI Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2011-2015 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції «11th European Turbomachinery Conference» (м. Мадрид, Іспанія, 2015 р.); XV Міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалення турбоустановок методами математичного та фізичного моделювання» (м. Харків, 2015 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображено в 12 наукових працях, з них 6 – у наукових періодичних фахових виданнях України (6 – у наукометричних базах даних), 6 – у матеріалах конференцій (1 – у Scopus).

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації і 10 додатків. Повний обсяг дисертації складає 163 сторінки, серед них 70 рисунків за текстом і 21 рисунок на 6 окремих сторінках, 14 таблиць за текстом і 3 таблиці на 3 окремих сторінках, списку використаних джерел інформації з 108 найменувань на 14 сторінках, 10 додатків на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значимість роботи.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану задач оптимального проектування проточних частин осьових турбін. Систематизовані існуючі підходи до підвищення аеродинамічної ефективності ступенів осьових турбін, а також питання розрахунку витоки в каналах турбіни.

Показано, що задачу аеродинамічної оптимізації ступеня турбіни можливо швидко вирішити в вісесиметричній двовимірній постановці з врахуванням нахилу та викривлення ліній току. Змоделювати та детально розглянути складні фізичні явища при протіканні робочого тіла в турбінному ступеню в двовимірній постановці не є можливим. До недоліків двовимірної теорії розрахунку відноситься використання емпіричних залежностей для оцінки основних видів втрат енергії в ступені, що знижує точність та достовірність отриманих результатів.

Результати аналізу свідчать, що перспективним є створення комбінованого методу аеродинамічної оптимізації ступеня осової турбіни, заснованого на використанні одновимірної та тривимірної теорії розрахунку та з врахуванням газодинамічних процесів в ущільненнях.

У другому розділі обґрунтовано вибір модельного ступеня турбіни для вирішення задач оптимізації та проведено верифікацію розрахунків газодинамічних параметрів в ступені з результатами експериментальних досліджень.

Об'єктом дослідження обрано модельний ступінь турбіни - прототип 3-го ступеня ЦВТ парової турбіни К-500-65/3000. В сопловій решітці використовується профіль ТС-1А з витіснювачем, в робочій - профіль активного типу Р2. В якості робочого тіла в модельній турбіні використовувалось повітря. Граничні умови: $P_0^* = 145500$ Па, $T_0^* = 387^\circ\text{К}$, $P_2 = 100300$ Па. Зазначеним граничним умовам відповідає дозвукова течія у всьому ступені (числа Маха не перевищують $M = 0,78$). Витрата повітря через турбіну $G = 1,63$ кг/с, число Рейнольдса на середньому радіусі ступеня $Re_{c1} = 3,5 \cdot 10^5$.

Проведено триетапну верифікацію результатів розрахунків досліджуваного об'єкта.

а). Верифікація двовимірного розрахунку ізолюваного робочого профіля при різних кутах атаки. Для виконання даного етапу верифікації використані дані експериментальних досліджень плоских турбінних решіток складених з профілю Р2. Експерименти здійснювалися на стендах кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ» при чотирьох різних кутах натікання: $26,5^\circ$; $30,1^\circ$; $36,5^\circ$; 40° ,

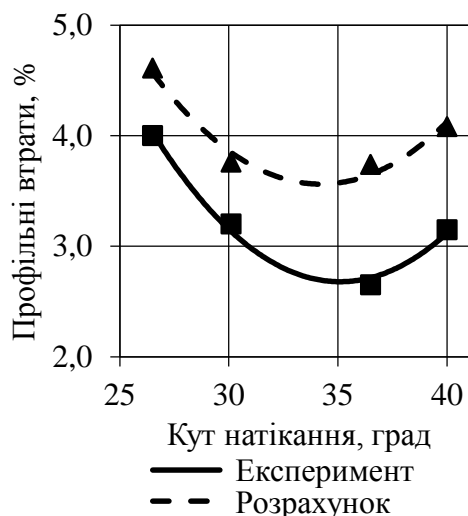


Рисунок 1 – Залежність профільних втрат від кута натікання потоку на решітку

при цьому вхідний геометричний кут профіля P2 складає $29,5^\circ$. Отримані результати розрахункового дослідження (рис. 1) показують, що розрахунковий експеримент дає дещо завищені значення коефіцієнта втрат енергії. Однак, експериментальна і розрахункова залежності є майже еквідистантними лініями. Це означає, що точки мінімуму втрат і в розрахункових дослідженнях і в експериментальних даних знаходяться при одному значенні кута натікання потоку на робочу решітку, що є визначальним в оптимізаційній задачі. Якщо ж стоїть завдання отримання розрахунковим шляхом близьких до експериментальних абсолютних значень втрат, то необхідно провести варіювання коефіцієнтів в моделі турбулентності.

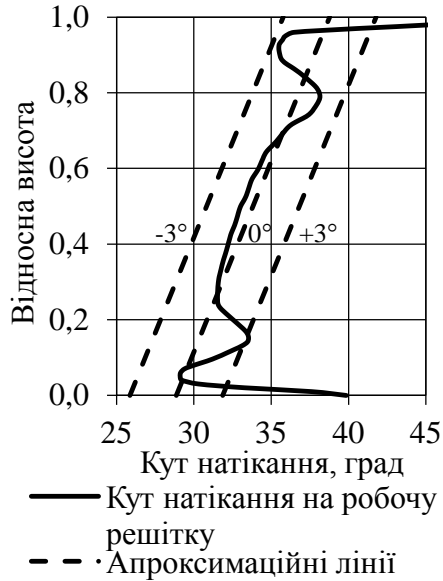


Рисунок 2 – Розподіл кута натікання потоку на робочу решітку та апроксимуючі лінії для різних кутів атаки

кута натікання по висоті. Тому вирішено апроксимувати криву за лінійним законом без урахування складної течії біля кореня та периферії решітки. Отримана апроксимаційна лінія розподілу кута натікання по висоті решітки має найменше середньоквадратичне відхилення (рис. 2). Для забезпечення безударного входу профіль робочої решітки змінений по висоті відповідно до отриманого апроксимаційного розподілу кута натікання.

Для отримання профілю з геометричним кутом входу, який би забезпечував заданий кут атаки, лінія апроксимації зміщала без зміни її кута нахилу на величину кута атаки. Таким чином створювався необхідний кут атаки по всій висоті робочої решітки. В якості досліджуваних кутів атаки обрані три кути: -3° , 0° та $+3^\circ$ (від'ємне значення відповідає удару в сторону зниженого тиску профіля, позитивне – удар в сторону підвищеного тиску профіля).

б). Верифікація результатів CFD розрахунку впливу удару на робочу лопатку в ступені турбіни.

На даному етапі проведено розрахунок модельного ступеня з циліндричними робочими лопатками без врахування витоки.

При заданих граничних умовах, фіксованій геометрії направляючого апарату, а також швидкості обертання ротора повітряної турбіни, змінити кут атаки потоку на робочу решітку можливо шляхом зміни її вхідного геометричного кута. При цьому з'являється можливість зробити вхідний геометричний кут змінний по висоті, адаптуючи його до реального кута натікання на лопатку.

Створити форму лопатки, яка повністю забезпечує безударний вхід уздовж радіуса, технологічно недоцільно через складну форму кривої

Таблиця 1 – Втрати в ступені при різних кутах натікання на робочу решітку

Втрати	-3°	0°	$+3^\circ$
В соплах	4,870 %	4,870 %	4,874 %
В лопатках	7,698 %	7,499 %	7,850 %
Сумарні	12,568 %	12,369 %	12,724 %

Зміна геометричного кута натікання істотно впливає на сумарні втрати в ступені (табл. 1). Найбільш низьке значення коефіцієнта втрат енергії виявилось при безударному натіканні, що приблизно відповідає загальновідомим уявленням про фізичну картину течії в ступені.

в). *Верифікація результатів тривимірного розрахунку роботи ступеня турбіни з урахуванням периферійної витоки.* Завершальний етап верифікації являє собою порівняння чисельних результатів розрахунку потоку в ступені турбіни з даними експериментального дослідження. В якості досліджуваного розраховувався модельний ступінь.

Таблиця 2 – Інтегральні характеристики роботи ступеня

Параметр	Експеримент	Розрахунок
ККД	83,8 %	82,71 %
Втрати в соплах	3,15 %	4,93 %
Втрати в лопатках	8,15 %	7,53 %
Втрати з вих. швидкістю	4,9 %	5,33 %
Витрата	1,63 кг/с	1,60 кг/с

Порівняння отриманих в результаті CFD розрахунку інтегральних (табл. 2) та розподілених по висоті (рис. 3, рис. 4) характеристик з даними експерименту показало прийнятний якісний та кількісний збіг картини течії робочого тіла в реальному ступені турбіни з результатами 3D розрахункових досліджень, проведеними з урахуванням периферійної витоки.

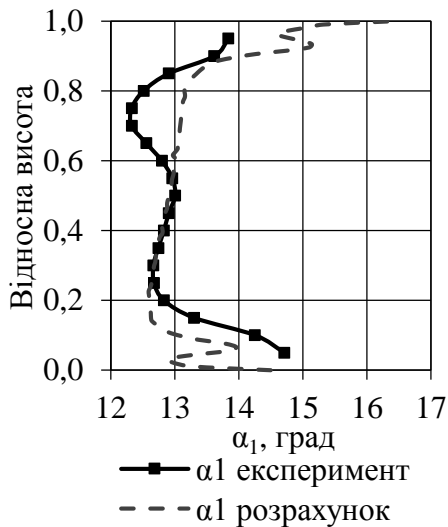


Рисунок 3 – Розподіл абсолютного кута виходу потоку з соплової решітки вздовж радіуса ступеня

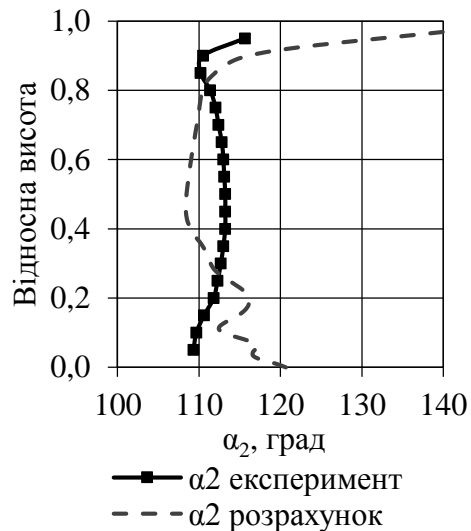


Рисунок 4 – Розподіл абсолютного кута виходу потоку з робочої решітки вздовж радіуса ступеня

Така процедура триетапної верифікації підтверджує можливість використання CFD розрахунків для достовірного визначення ефективності ступеня турбіни в ході оптимізаційного процесу.

У третьому розділі розроблено комбінований метод аеродинамічної оптимізації ступеня осьової турбіни.

Оптимізаційний підхід на етапі пошуку оптимального рішення ґрунтується на заміні математичної моделі, яка описує фізичні явища і процеси в проточній частині осьової турбіни, апроксимаційними залежностями компонент векторів

$Y(q)$ у вигляді повного квадратичного полінома другого порядку (формальними макромоделями)

$$Y(q) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i q_i + \sum_{i=1}^n A_{ii} q_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n A_{ij} q_i q_j. \quad (1)$$

Залежність (1) відображає лише формальний зв'язок між вхідними і вихідними параметрами. Побудова макромоделей критеріїв якості та функціональних обмежень виконується за допомогою методів теорії планування експерименту (використовуються трирівневі плани Бокса-Бенкіна та насичені плани Рехтшафнера). Формальна макромодель (1) уточнена з використанням інтерполяційних кубічних сплайнів, що дозволяє з високим ступенем точності і адекватності описувати функції різної складності. В оптимізаційному алгоритмі передбачається в якості методу пошуку оптимальних рішень використовувати псевдовипадкові послідовності чисел ЛПт.

Задача оптимізації турбінного ступеня полягає у постановці екстремальної задачі

$$\eta_u = \frac{N_c}{G \cdot H_0} \rightarrow \max, \quad (2)$$

де N_c , G , H_0 є функціями управляючих параметрів: для одновимірної оптимізації α_1 і β_2 ; для тривимірної оптимізації – коефіцієнти законів закрутки m_1 , m_2 та величина коригування вхідного геометричного кута робочого профіля $\Delta\beta_{1r}$. Обмежуючим фактором є постійне значення витрати ступеню.

Для пошуку оптимальних значень параметрів на етапі одновимірної оптимізації використовується математична модель одномірної течії робочого тіла в проточній частині, яка містить у собі:

– рівняння енергії та нерозривності:

$$\begin{aligned} H_0 = i_0^* = i_1 + C_1^2/2 = \text{const}; \quad G_1 = \rho_1 C_{1z} F_1 = \text{const}; \\ H = i_1 + C_1^2/2 - u_1 C_{1u} = i_2 + W_2^2/2 - u_2^2/2 = \text{const}; \quad G_2 = \rho_2 W_{2z} F_2 = \text{const}; \end{aligned} \quad (3)$$

– рівняння процесу й стану у перерізах за соплом та робочою лопаткою:

$$\begin{aligned} S_0^* - S_{1T}(P_1, (1/\varphi^2)[i_1 - (1 - \varphi^2)i_0^*]) = 0; \quad S_1 - S_{2T}(P_2, (1/\psi^2)[i_2 - (1 - \psi^2)i_{2w}^*]) = 0; \\ T = T(P, i); \quad \rho = \rho(P, i); \quad S = S(P, i); \end{aligned} \quad (4)$$

– кінематичні співвідношення, що зв'язують кути і швидкості потоку в абсолютному та відносному русі та замикаючі співвідношення.

Пошук оптимальних значень виконується при заданій масовій витраті і забезпеченні безударного натікання потоку на робочу решітку (тобто $\beta_1 = \beta_{1r}$). Значення параметрів на вході і виході з ступеня, а також масова витрата при цьому, відповідають даним з 3D розрахунку вихідного ступеня. Розподіл параметрів потоку вздовж радіуса виконується відповідно до закону $C_u r = \text{const}$.

На етапі тривимірної оптимізації виконуються CFD розрахунки в основі яких лежить вирішення усередненої по Рейнольдсу системи рівнянь Нав'є-Стокса. Модель турбулентності, що використовувалася – $k-\omega$ SST, сіткові моделі будувалися з урахуванням рекомендованих значень параметру y^+ для зазначеної моделі турбулентності.

Алгоритм розробленого методу зображено на рис. 5.



Рисунок 5 – Алгоритм оптимізаційного процесу

Розроблений алгоритм (рис. 5) жорстко не прив'язаний до певного набору управляючих параметрів, які можуть змінюватися в залежності від завдань оптимізації. При цьому рекомендується для етапу тривимірної оптимізації обирати параметри, вплив яких на течію можна коректно оцінити тільки в тривимірній постановці. Всі інші параметри краще використовувати на етапі одновимірної оптимізації для скорочення часу виконання розрахункового експерименту.

Проведено оптимізацію модельного турбінного ступеня з двома величинами радіальних зазорів: 0,5 мм та 1 мм. В якості управляючих параметрів на етапі одновимірної оптимізації використовувалися: кут виходу з соплової решітки α_1 та кут виходу з робочої решітки β_2 (обидва на середньому радіусі). На етапі тривимірної оптимізації: закони закрутки соплової та робочої лопаток і величина коригування вхідного геометричного кута робочої решітки $\Delta\beta_{1r}$. Для варіювання законами закрутки лопаток використовувалися залежності виду:

$$r_1^{m_1} \operatorname{ctg} \alpha_y = \operatorname{const}, \quad r_2^{m_2} \operatorname{ctg} \beta_y = \operatorname{const}. \quad (5)$$

Параметри m_1 та m_2 характеризують градієнти кутів закрутки, тому в даному дослідженні виступають у якості параметрів що варіюються. При $m_i > 0$ отримаємо зростаючі до периферії кути (пряма закрутка), а при $m_i < 0$ – кути зменшуються (зворотня закрутка). Закону закрутки $C_u r = \operatorname{const}$ відповідають значення $m_1 = 1$, $m_2 = -1$, що забезпечує мінімум втрат з вихідною швидкістю для ступеня з циліндричними обводами.

В результаті оптимізації абсолютний ККД ступенів збільшився на 0,5632 % для ступеня з радіальним зазором 0,5 мм та на 0,3547 % для ступеня з радіальним зазором 1,0 мм. При цьому, збільшення ККД відбулося за рахунок зниження втрат на сопловій, робочій решітках і з вихідною швидкістю (табл. 3).

Таблиця 3 – Інтегральні результати оптимізації

Параметр	радіальний зазор 0,5 мм			радіальний зазор 1,0 мм		
	Вихідний ступень	1D опт	3D опт	Вихідний ступень	1D опт	3D опт
ККД, %	85,29	85,67	85,85	83,53	83,72	83,88
$\xi_{\text{сопло}}, \%$	3,36	3,23	3,27	3,41	3,31	3,31
$\xi_{\text{лопатка}}, \%$	7,43	6,46	6,31	7,49	6,50	6,41
$\xi_{\text{вих.шв.}}, \%$	5,10	4,85	4,84	5,70	5,45	5,37

Розроблений алгоритм дозволяє впливати на значення ступеня реактивності як на середньому радіусі (він був збільшений), так і перерозподіляти його по всій висоті ступеня. Реактивність ступеня біля периферії була знижена в порівнянні з одновимірною оптимізацією (рис. 6). У свою чергу це зменшило протікання в надбандажний зазор. Вибір оптимальних законів закрутки в тривимірній оптимізації призводить до вирівнювання кута атаки по всій висоті робочого профілю (рис. 7). Крім того, за рахунок варіювання вхідним геометричним кутом профілю було отримано, що оптимальне обтікання робочих решіток досягається при наявності кута атаки потоку + 6,5°.

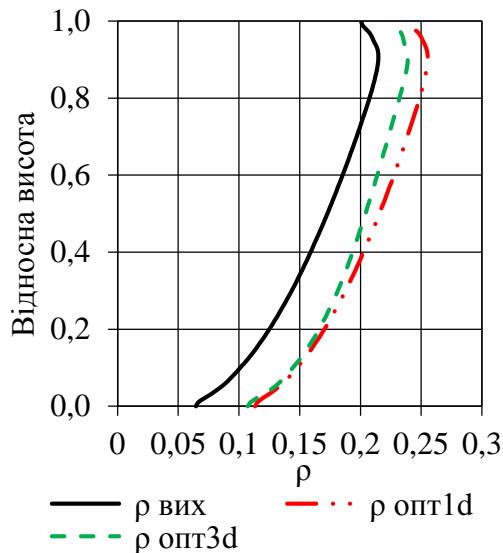


Рисунок 6 – Розподіл ступеня реактивності вздовж радіуса ($\delta = 0,5$ мм)

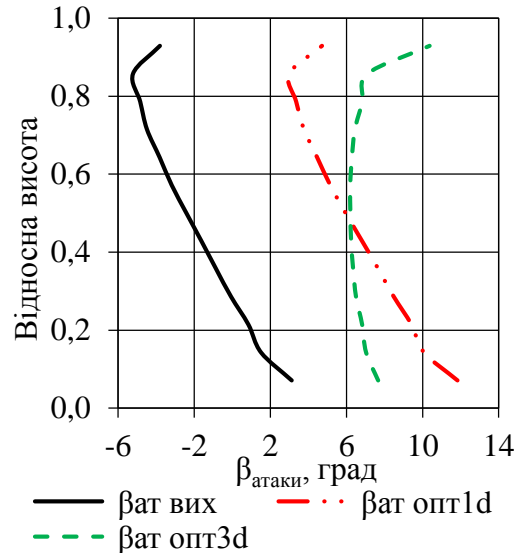


Рисунок 7 – Розподіл кута атаки потоку на робочу решітку вздовж радіуса ($\delta = 0,5$ мм)

Аналіз результатів оптимізації модельного ступеня турбіни показує, що розроблений метод оптимізації дозволяє враховувати характер течії в міжлопатковому каналі і вплив на течію витоки в ступені та комбінує в собі одновимірний та тривимірний підхід, що дозволяє створювати аеродинамічно ефективні ступені при цьому скорочуючи вартість обчислювального експерименту.

У четвертому розділі розроблено методіку оцінки коефіцієнту витрати вісерадіального ущільнення в залежності від його геометричних і режимних характеристик, та з урахуванням зсуву ротора відносно статора викликаного тепловим розширенням.

Останнім часом в потужних парових турбінах все частіше використовуються вісерадіальні ущільнення. Надійних емпіричних залежностей для оцінки коефіцієнту витрати ущільнень даного виду немає. Щоб мати змогу точно оцінювати витоку через вісерадіальне ущільнення проведено CFD дослідження для отримання формальної макромоделі залежності коефіцієнту витрати ущільнення від основних параметрів: відношення швидкостей u/c_ϕ , куту потоку α_1 біля периферії, окружної швидкості u , кількості гребенів зліва n_1 , кількості гребенів справа n_2 , кроку між гребенями t , висоти гребенів h , радіального зазору δ , ширини середньої камери T , зміщення від теплового розширення X (рис. 8).

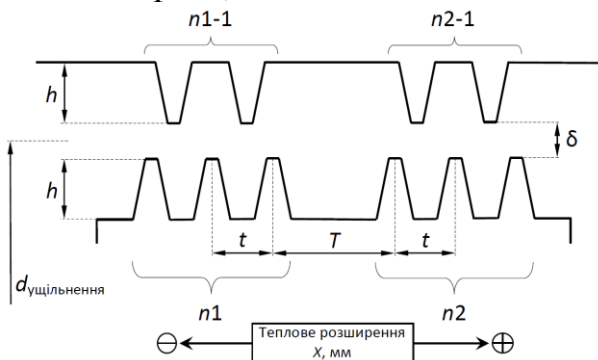


Рисунок 8 – Схема вимірів вісерадіального ущільнення

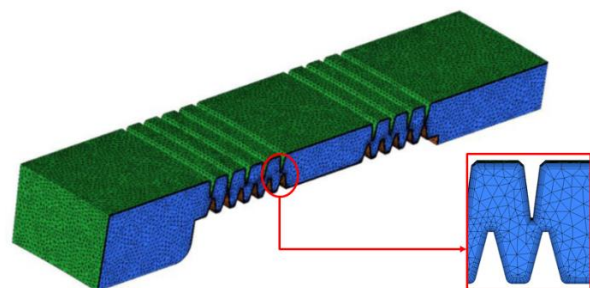


Рисунок 9 – Тривимірний розрахунковий моделювання вісерадіального ущільнення

Для проведення CFD досліджень використовувався сектор ущільнення, що складає 1/100 частину окружності. Будувалися тетрадральні сіткові моделі з призматичним примежовим шаром (рис. 9). Середня кількість елементів в розрахунковому об'ємі складала 1 млн. Робоче тіло – перегріта водяна пара.

Сумарна кількість CFD розрахунків, проведених у даному дослідженні, дорівнювала 131. Це дозволило отримати формальну макромодель підвищеної точності і побудувати залежності коефіцієнта витрати від кожного з параметрів, що варіювалися. Під час чисельного аналізу результатів газодинамічних розрахунків зроблені наступні висновки:

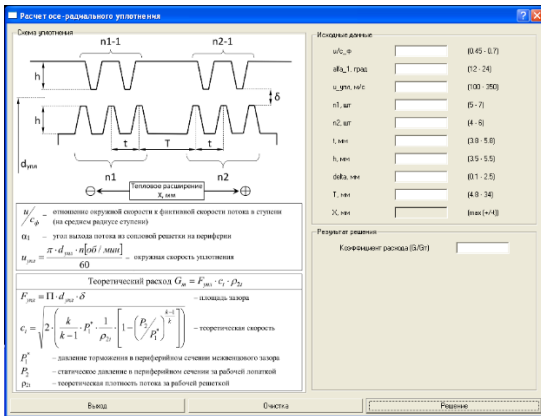


Рисунок 10 – Інтерфейс програми «Clearance»

а) коефіцієнт витрати через ущільнення змінюється непропорційно зміні радіального зазору ущільнення. Дана ситуація зумовлена нелінійністю зміни реальної витрати при малих радіальних зазорах;

б) оптимальне значення ширини середньої камери знаходиться в межах 27-30 мм. Зі зменшенням величини середньої камери і зведенням її до ширини кроку між гребнями ущільнення, коефіцієнт витрати лінійно зростає. Дана залежність підтверджується і якщо аналізувати вплив кроку між гребнями ущільнення на коефі-

цієнт витрати: зі збільшенням кроку коефіцієнт витрати зменшується;

в) залежність коефіцієнта витрати від зсуву, викликаного тепловим розширенням в даному ущільненні змінюється в межах 17 %.

Для зручності використання розробленої методики створена спеціалізована програма «Clearance», яка в діалоговому режимі дозволяє отримати величину коефіцієнта витрати через ущільнення задавши значення вихідних параметрів. Інтерфейс програми показано на рис. 10.

Додатково проведено CFD дослідження для порівняння вісерадіальних ущільнень з більш простими за

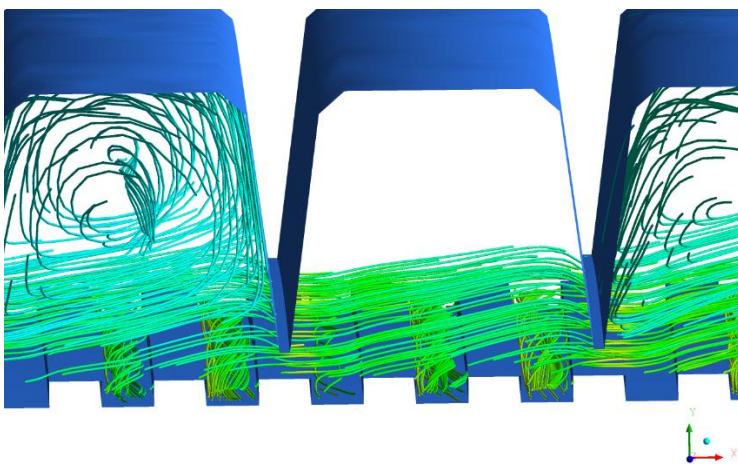


Рисунок 11 – Лінії току в прямоточному ущільненні з підвищеною штучною шорсткістю на бандажі

конструкцією прямоточними. Для цього використовувалося вихідне вісерадіальне ущільнення з радіальним зазором 0,5 мм. Виявилось, що витока через прямоточне ущільнення на 7 % нижче ніж у аналогічного вісерадіального при всіх інших рівних умовах. Така ситуація відбувається через зменшення фактичного ефективного зазору в прямоточному ущільненні.

Відзначено, що додавання штучної шорсткості на бандажі прямооточного ущільнення у вигляді прямокутних канавок-турбулізаторів (рис. 11) знижує виток через ущільнення на 45 % в порівнянні з вихідним вісерадіальним. При цьому прямооточне ущільнення такого типу залишається більш ефективним ніж вісерадіальне і при збільшенні радіального зазору до величини 1 мм. Подальше збільшення радіального зазору до величини 1,7 мм призводить до поступового вирівнювання кількості виток в обох ущільненнях. Зниження виток через зазначене прямооточне ущільнення пояснюється наявністю додаткових обертових зон в канавках, що призводить до збільшення гідравлічного опору всього ущільнення (рис. 11). Остаточні рекомендації по використанню ущільнень слід приймати, враховуючи можливе значне збільшення зазору під час експлуатації турбін.

У п'ятому розділі виконано оптимізацію реального турбінного ступеня ЦВТ з застосуванням комбінованого методу.

Для цього математична модель одновимірного розрахунку ступеня турбіни, що використовується на етапі одновимірної оптимізації, доповнена залежностями для точного оцінювання виток через вісерадіальні ущільнення.

В якості об'єкта оптимізації використовується 3-ій ступінь ЦВТ турбіни К-540-23,5, що працює на перегрітій водяній парі. Надбандажне ущільнення в ступені – вісерадіального типу.

Побудовано сіткову модель турбінного ступеня. Розрахунковий об'єм (рис. 12) складалася з трьох доменів: домену соплових решіток Nozzle; домену робочих решіток Blade і домену, що об'єднує в собі міжвінцевий зазор, радіальний зазор і вихлопний патрубок (домен Clearance).

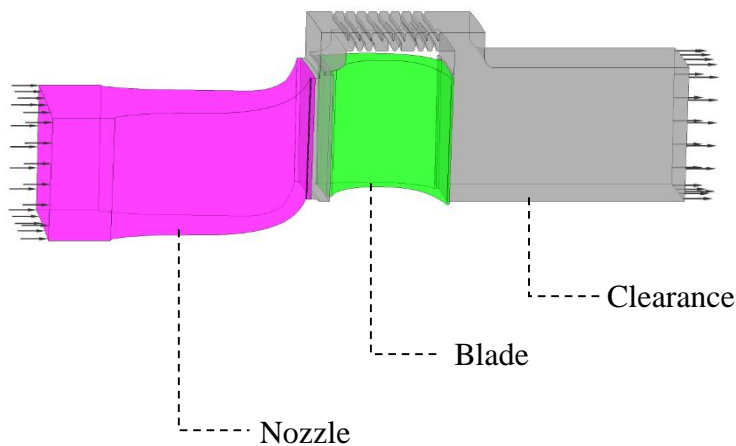


Рисунок 12 – Розрахунковий об'єм

Для соплової та робочої решіток побудовано гексагональну сітку розміром 180x98x90 та 125x98x90 елементів відповідно. Домен Clearance побудовано з тетрадральних елементів зі згущенням сітки в місцях найбільших градієнтів і призматичним примежевим шаром. Кількість елементів в домені дорівнювала 7,3 млн. Сумарна кількість елементів

в розрахунковому об'ємі перевищила значення 10 млн. На всіх твердих границях розрахункового об'єму створено згущення сітки для забезпечення значення параметра y^+ в межах рекомендованих значень (<1).

В якості керуючих параметрів на етапі одновимірної оптимізації використовувалися: кут виходу з соплової решітки α_1 ; кут виходу з робочої решітки β_2 ; кількість лопаток соплової решітки Z_1 ; кількість лопаток робочої решітки Z_2 . На

етапі тривимірної оптимізації: закони закрутки соплової та робочої лопаток (згідно залежностей (5)) і величина коригування вхідного геометричного кута робочої решітки $\Delta\beta_{1r}$.

Таблиця 4 – Результати 3D розрахунку вихідного ступеня та двох отриманих оптимальних варіантів

Параметр	Вихідний ступінь	1D оптимізація	3D оптимізація
ККД, %	88,236	88,823	89,244
$\rho_{ср}$, %	14,264	22,896	21,803
Витока (G_y/G), %	1,219	1,426	1,39163
$\xi_{сопло}$, %	3,591	2,766	2,748
$\xi_{лопатка}$, %	6,463	5,922	5,386
$\xi_{вих.шв.}$, %	3,045	2,947	2,983
Z_c , шт	58	44	44
Z_p , шт	68	68	68
Кут атаки, °	6,287	-0,074	9,655

В результаті оптимізації ККД ступеня в одновимірній оптимізації збільшений на 0,587 %, в тривимірній оптимізації – ще на 0,421 % (сумарно – 1,008 %). Зміна кількості лопаток при фіксованому діаметрі колеса фактично призводить до зміни відносного кроку (t/b). Вибір його оптимального значення в 1D оптимізації, дозволив зменшити втрати в сопловій решітці. Збільшення ККД після 3D оптимізації відбулося за рахунок зменшення втрат в робочій решітці (табл. 4).

Ступінь реактивності на середньому радіусі збільшилася, що призвело до збільшення протікання через радіальний зазор (табл. 4).

Однак, цей негативний ефект нівелюється загальним поліпшенням обтікання робочого тіла соплової та робочої решіток.

Як і при оптимізації модельного ступеня вибір оптимального поєднання законів закруток лопаток і вхідного геометричного кута робочої решітки β_{1r} дозволив вирівняти кут натікання та кут атаки на робочу лопатку вздовж радіуса ступеня (рис. 13).

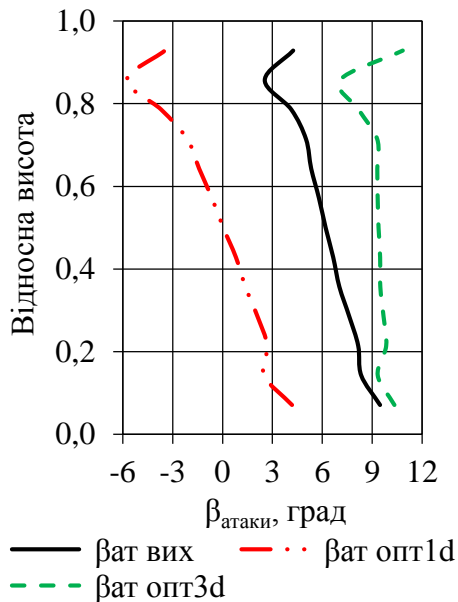


Рисунок 13 – Розподіл кута атаки на робочій решітці вздовж радіуса ступеня

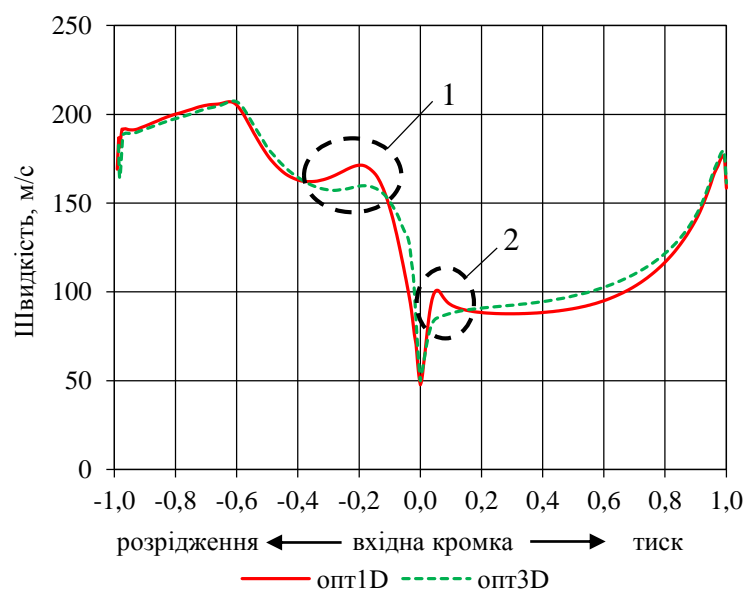


Рисунок 14 – Розподіл швидкості по обводу робочого профілю на середньому радіусі для 1D і 3D оптимальних варіантів

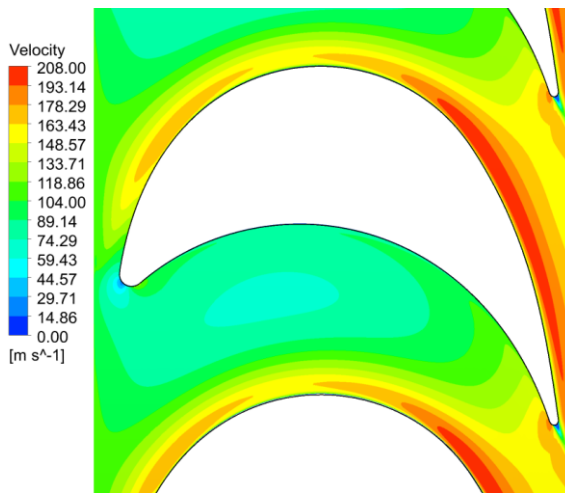


Рисунок 15 – Поле швидкості на середньому радіусі навколо робочого профілю після 1D оптимізації

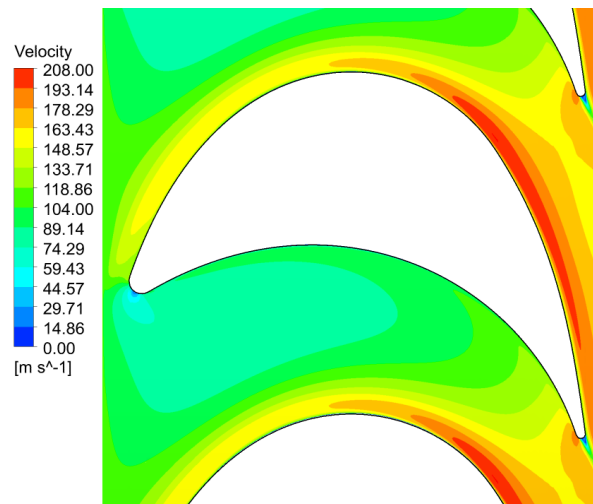


Рисунок 16 – Поле швидкості на середньому радіусі навколо робочого профілю після 3D оптимізації

Детальний розгляд течії в ступені показав, що профіль після 1D оптимізації має локальне прискорення потоку на стороні зниженого тиску недалеко від вхідної кромки з подальшим його гальмуванням, що свідчить про наявність локальної дифузornoї ділянки (рис. 15). В результаті 3D оптимізації у робочій решітці змінений вхідний геометричний кут β_{1r} , що спричинило зменшення вигину профілю і дозволило збільшити геометричну ступінь конфузornості міжлопаткового каналу. Це призвело до усунення дифузornих ділянок в каналі (рис. 16) і помітно поліпшило розподіл швидкості потоку по обводу профілю (рис. 14), що послужило основною причиною зниження втрат в робочому колесі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу розробки та апробації комбінованого методу оптимізації ступеня осьової турбіни, який, ґрунтуючись на ітераційному процесі почергового вирішення одновимірної та тривимірної задач, дозволяє значно підвищити аеродинамічну ефективність всього ступеня при незмінній витраті робочого тіла через неї. Наявність в запропонованому оптимізаційному методі етапу тривимірної оптимізації дозволяє поліпшити обтікання лопаткових вінців, тим самим знайти резерви підвищення ККД всього ступеня.

У роботі отримані наступні результати:

1. Проведено всебічну триетапну верифікацію чисельної моделі досліджуваного ступеня турбіни, яка включала в себе порівняння двох і тривимірного CFD розрахунків плоскої решітки і ступеня в цілому з результатами експериментального дослідження. Це підтвердило можливість використання CFD розрахунків для достовірного визначення ефективності ступеня турбіни в ході оптимізаційного процесу.

2. Запропоновано комбінований метод оптимізації ступеня осьової турбіни, який використовує одновимірну та тривимірну оптимізацію, дозволяє в

процесі оптимізації врахувати як характер течії робочого тіла в решітках, так і вплив на неї витоки, що має місце в ступені. Таке комбінування дозволяє істотно скоротити час отримання оптимального результату.

3. Шляхом проведення серії CFD розрахунків розроблена методика, що дозволяє визначати коефіцієнт витрати вісерадіального ущільнення в залежності від його геометричних і режимних характеристик, а також з урахуванням зсуву ротора відносно статора від теплового розширення. На основі розробленої методики створено спеціалізовану програму «Clearance», яка дозволяє в діалоговому режимі визначати величину коефіцієнта витрати через вісерадіальне ущільнення в залежності від конструктивних, режимних та теплових характеристик. Надалі вихідний код створеної програми був інтегрований в єдиний інтегрований інформаційний простір САПР «Турбоагрегат», що дозволило не тільки визначати коефіцієнти витрати в ущільненні, а й проводити оптимізацію турбінного ступеня при використанні в ньому вісерадіальних ущільнень.

4. Проведено ряд CFD розрахунків для порівняння вісерадіальних ущільнень з прямоточними та виявлення нових ефективних конструкцій ущільнень, що забезпечують нижчі значення коефіцієнта витрати. Показано, що, створивши штучну шорсткість на валу прямоточного ущільнення (шляхом розміщення турбулізаторів) можна зменшити витрату через нього на 45 % в порівнянні з вісерадіальними ущільненнями. Таку ефективність нові ущільнення мають в діапазоні радіальних зазорів 0,5-1,0 мм, подальше збільшення радіального зазору призводить до поступового вирівнювання кількості витоки в обох ущільненнях. Остаточні рекомендації по їх використанню слід приймати, враховуючи можливе значне збільшення зазору δ під час експлуатації турбін.

5. З використанням розробленого методу виконана оптимізація 3-го ступеня ЦВТ турбіни К-540-23,5, яка працює на перегрітій водяній парі. За результатами оптимізації створено новий ступінь з абсолютним ККД на 1 % вище ніж у початкового варіанту.

6. Проведено детальний аналіз причин підвищення ефективності в ході оптимізаційного процесу, який показав, що збільшення ККД відбувається за рахунок:

а) вибору на середньому радіусі оптимальних α_1 , β_2 , значень реактивності ρ і відносного кроку решітки t/b , що значно знижує втрати в решітках і з вихідною швидкістю;

б) вибору оптимального значення вхідного геометричного кута β_{1r} робочого профілю, який забезпечив поліпшення обтікання профілю;

в) усунення локальних дифузійних ділянок в міжлопатковому каналі;

г) знаходження оптимальних законів закрутки, що забезпечують рівномірне натікання потоку по всій висоті робочих лопаток.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджені в САПР «Турбоагрегат», використовуються в процесі проектування нових і оптимізації існуючих парових турбін виробництва ПАТ «Турбоатом» і в навчальному процесі НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Максютя Д.И. Исследование влияния параметров модели турбулентности на результаты CFD расчета турбинной решетки при различных углах атаки [Текст] / А.В. Бойко, М.В. Бурлака, Д.И. Максютя // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №6. – С. 19 – 23.

Здобувачем проведено вибір коефіцієнтів моделі турбулентності для найкращого збігу результатів чисельного CFD розрахунку з результатами експериментальних досліджень впливу кута атаки на рівень втрат робочої решітки активного типу.

2. Максютя Д.И. Численный расчет влияния удара на рабочую лопатку при работе в ступени [Текст] / А.В. Бойко, М.В. Бурлака, Д.И. Максютя // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №7. – С. 24 – 28.

За допомогою CFD-програми здобувачем проведено дослідження впливу вхідного геометричного кута робочої решітки на аеродинамічну ефективність ступеня ЦВТ турбіни.

3. Максютя Д.И. Верификация численного расчета работы ступени осевой турбины с учетом периферийной протечки [Текст] / А.В. Бойко, Д.И. Максютя // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №13. – С. 18 – 23.

Здобувачем виконані CFD розрахунки роботи турбінного ступеня з урахуванням витоків у радіальний зазор та виконано їх обробку і порівняння результатів з експериментальними даними.

4. Максютя Д.И. Метод пространственной оптимизации ступени осевой турбины с учетом обтекания турбинных профилей и периферийной протечки [Текст] / А.В. Бойко, Д.И. Максютя // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №12. – С. 5 – 11.

Здобувачем виконано тривимірні CFD розрахунки по дослідженню впливу законів закрутки та вхідного геометричного кута робочого профіля на ефективність роботи турбінного ступеня з урахуванням витоків у надбандажне ущільнення.

5. Максютя Д.И. Разработка и апробация комплексного метода оптимизации ступени осевой турбины [Текст] / А.В. Бойко, А.П. Усатый, Д.И. Максютя // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – №17. – С. 5 – 12.

Здобувачем особисто розроблено алгоритм комбінованої оптимізації та проведено оптимізацію турбінного ступеня.

6. Максютя Д.И. Разработка методики оценки качества осерадиальных уплотнений турбин [Текст] / А.В. Бойко, А.П. Усатый, Д.И. Максютя // Проблеми машинобудування. – Харків: ПМаш ім. А.М. Підгорного. – 2015. – Т. 18. № 3. – С. 26 – 30.

Здобувачем виконано CFD розрахунки, розроблено методику та спеціалізовану комп'ютерну програму розрахунку витоків в вісерадіальних

надбандажних ущільненнях в залежності від геометричних, режимних параметрів та з урахуванням зміщення ротора відносно статора.

7. Максюта Д.І. Підвищення точності розрахунку в'язкої течії в турбінній решітці [Текст] / А.В. Бойко, М.В. Бурлака, Д.І. Максюта // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХП», 2011. – С. 219.

Здобувачем проведено двовимірні CFD розрахунки прямої турбінної решітки з робочими профілями ІММК.

8. Максюта Д.І. Використання профілювання для забезпечення безударного натікання по висоті робочої решітки / А.В. Бойко, М.В. Бурлака, Д.І. Максюта // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХП», 2012. – С. 236.

Здобувачем розроблено методу корегування обводу робочого профіля під реальні значення кута натікання потоку.

9. Максюта Д.І. CFD розрахунок в'язкої течії в турбінній ступені / А.В. Бойко, Д.І. Максюта // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХП», 2013. – С. 265.

Здобувачем виконано обробку даних чисельних досліджень та їх порівняння з експериментальними результатами.

10. Максюта Д.І. Просторова оптимізація 3-ї ступені ЦВТ турбіни К-500-65/3000 / А.В. Бойко, Д.І. Максюта // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХП», 2014. – С. 256.

Здобувачем проведено просторову аеродинамічну оптимізацію модельного турбінного ступеня за допомогою CFD розрахунків.

11. Maksjuta D. Optimal design of high pressure steam turbine stage using computational fluid dynamics / A.Boiko, D.Maksjuta // Proceedings of 11th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC11, March 23-27, 2015. – Madrid, Spain. – 2015. – ETC2015-257.

Здобувачем резюмовано накопичений досвід по напряму просторової оптимізації турбінних ступенів та розроблено метод оптимізації.

12. Максюта Д.І. Комплексний алгоритм оптимізації турбінного ступеня / А.В. Бойко, Д.І. Максюта // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХП», 2015. – С. 243.

Здобувачем виконана обробка отриманих в процесі оптимізації CFD розрахунків та зроблено детальний аналіз причин підвищення ККД турбінного ступеня.

АНОТАЦІЇ

Максюта Д.І. Комбінований метод аеродинамічної оптимізації ступеня осьової турбіни. На правах рукопису.

Дисертація присвячена розробці комбінованого методу аеродинамічної оптимізації ступеня осьової турбіни, який ґрунтуючись на почерговому вирішенні одновимірної та тривимірної задач, дозволяє значно підвищити ефективність всього ступеня враховуючи як характер течії робочого тіла в решітках, так і вплив на неї витоки.

На підставі сучасної тенденції до використання методів чисельної аеродинаміки (CFD) при оптимізації проточних частин осьових турбін і при цьому задіяючи якомога більшу кількість управляючих параметрів в оптимізаційному процесі, запропонований комбінований метод оптимізації. Запропонований метод використовує одновимірну та тривимірну оптимізації, що дозволяє істотно підвищувати аеродинамічну ефективність ступенів, при цьому значно заощаджуючи час, необхідний для проведення розрахунків.

При розробці методу оптимізації достовірність застосування методів CFD підтверджена шляхом триетапного порівняння результатів розрахунків з результатами експериментальних досліджень.

Для отримання більш точних даних кількості витоки робочого тіла в радіальний зазор при проведенні етапу одновимірної оптимізації, розроблена методика для визначення коефіцієнта витрати вісерадіального ущільнення в залежності від його геометричних і режимних характеристик, а також з урахуванням зсуву ротора відносно статора від теплового розширення. Дана методика розроблялася шляхом проведення серії CFD розрахунків. Додатково проведено CFD дослідження для порівняння вісерадіальних ущільнень з прямоточними та виявлення нових ефективних конструкцій ущільнень, яке показало, що шляхом створення штучної шорсткості на валу прямоточного ущільнення можна зменшити витрату через нього на 45 % в порівнянні з вісерадіальними ущільненнями.

За допомогою запропонованого методу оптимізації та методики розрахунку витоки в вісерадіальному ущільненні виконана оптимізація 3-го ступеня ЦВТ турбіни К-540-23,5. Результати проведених розрахунків показали, що абсолютний ККД нового ступеня збільшився більш ніж на 1 %.

Ключові слова: ступінь осьової турбіни, комбінована оптимізація, одновимірна та тривимірна теорії, CFD моделювання, вісерадіальне та прямоточне ущільнення, методика оцінки витоки, збільшення ККД.

Максюта Д.И. Комбинированный метод аэродинамической оптимизации ступени осевой турбины. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – турбомашины и турбоустановки. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016.

Диссертация посвящена разработке комбинированного метода аэродинамической оптимизации ступени осевой турбины, который основываясь на поочередном решении одномерной и трехмерной задач, позволяет значительно повысить эффективность всей ступени при этом учитывая как характер течения рабочего тела в решетках, так и влияние на него протечек.

На основании современных тенденций к использованию методов вычислительной аэродинамики (CFD) при оптимизации проточных частей осевых турбин и при этом задействуя как можно большее количество управляющих параметров в оптимизационном процессе, предложен комбинированный метод оптимизации. Предложенный метод использует одномерную и трехмерную оптимизацию, что позволяет существенно повышать аэродинамическую эффективность ступеней, при этом значительно экономя время, необходимое для проведения расчетов.

При разработке метода оптимизации достоверность применения методов CFD подтверждена путем трехэтапного сравнения результатов расчетов с результатами экспериментальных исследований.

Для получения более точных данных количества утечки рабочего тела в радиальный зазор при проведении этапа одномерной оптимизации, разработана методика для определения коэффициента расхода осерадиального уплотнения в зависимости от его геометрических и режимных характеристик, а также с учетом смещения ротора относительно статора от теплового расширения. Данная методика разрабатывалась путем проведения серии CFD расчетов. Дополнительно проведено CFD исследование для сравнения осерадиальных уплотнений с прямоточными и выявления новых эффективных конструкций уплотнений, показавшее, что путем создания искусственной шероховатости на валу прямоточного уплотнения можно уменьшить расход через него на 45 % по сравнению с применяемыми осерадиальными уплотнениями.

С помощью предложенного метода оптимизации и методики расчета протечек в осерадиальном уплотнении выполнена оптимизация 3-й ступени ЦВД турбины К-540-23,5. Результаты проведенных расчетов показали, что повышение эффективности ступени на этапе одномерной оптимизации происходит за счет выбора на среднем радиусе оптимальных α_1 , β_2 , значений степени реактивности ρ и относительного шага решетки t/b . Повышение эффективности ступени на этапе трехмерной оптимизации происходит за счет: выбора оптимального значения входного геометрического угла β_{1r} рабочего профиля, обеспечившего улучшение обтекания профиля; устранения локальных диффузорных участков в межлопаточном канале; нахождения оптимальных законов закрутки, обеспечивающих равномерное натекание потока по всей высоте рабочих лопаток. Суммарно абсолютный КПД новой ступени увеличился более чем на 1 %.

Ключевые слова: ступень осевой турбины, комбинированная оптимизация, одномерная и трехмерная теории, CFD моделирование, осерадиальное и прямоточное уплотнение, методика оценки протечек, увеличение КПД.

Maksiuta D.I. The combined method of aerodynamic optimization of the axial turbine stage. Manuscript.

Thesis for degree of Candidate of Sciences in Technique for speciality 05.05.16 – turbomachinery and turbine-installations. – National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute», Kharkiv, 2016.

This thesis deals with the development of the combined method of aerodynamic optimization of the axial turbine stage, based on the iterative usage of one-dimensional and three-dimensional theories, thereby can significantly improve the efficiency of the entire stage taking into account the nature of the flow around turbine profiles and the impact of leakage on it.

Based on current trends of using computational fluid dynamic methods (CFD) while optimizing of the flow path of the axial turbines, with engaging the largest possible number of control parameters in the optimization process, the combined optimization method is provided. Developed method uses one-dimensional and three-dimensional optimization theories and can noticeably improve aerodynamic efficiency of whole turbine stage, thus significantly saving the time required for the simulations.

A three-step comprehensive comparison of the results of simulations with the experimental data confirmed the accuracy of CFD usage while developing the optimization method.

To calculate amount of leakage in the radial clearance during one-dimensional optimization phase more accurate, the methodology of flow rate determining in axial-radial seals depending on geometrical, operational characteristics and considering rotor against stator displacement was developed using a series of CFD simulations. Advanced CFD study was conducted to compare the axial-radial seal with the straight-flow one and to identify the new more effective designs of seal. It was shown that creation of artificial roughness on the shaft of the straight-flow seal could reduce the leakage by 45 % compared to the axial-radial seal.

Utilizing the developed optimization method and the methodology of leakage calculation in the axial-radial seal, the optimization of the 3rd stage of the high pressure turbine K-540-23,5 was made. As a result of the optimization a new stage with an absolute efficiency increase more than 1 % compared to the original design was obtained.

Keywords: axial turbine stage, combined optimization, one-dimensional and three-dimensional theory, CFD modeling, direct-flow and axial-radial seal, leakage assessment methodology, efficiency increasing.



