

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

БАРАНІК ВАЛЕНТИН СЕРГІЙОВИЧ



УДК 621.165

**ПРОСТОРОВА АЕРОДИНАМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ НАПРАВЛЯЮЧОЇ
РЕШІТКИ ОСЬОВОЇ ТУРБІНИ**

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,
член-кореспондент НАН України
Русанов Андрій Вікторович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
завідувач відділу гідроаеромеханіки
енергетичних машин

кандидат технічних наук
Швецов Віктор Леонідович,
Публічне акціонерне товариство
«Турбоатом», головний конструктор
парових турбін

Захист відбудеться « 30 » серпня 2016 р. о 13⁰⁰ 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 « ___ » липня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасних умовах розвитку енергетичного сектору промисловості України найбільш злободенними є питання підвищення енергоефективності турбоустановок ТЕС та АЕС, які проектуються або модернізуються. Аеродинамічні характеристики турбоустановки значною мірою залежать від досконалості елементів її проточної частини, зокрема решіток лопаткових апаратів, для яких доцільно визначати оптимальні конструкції. При цьому подальший розвиток проектування таких решіток можливий лише з урахуванням сучасних технологій та прикладних програм просторового розрахунку течії.

Оптимізація турбінних решіток – це процес визначення досконалої аеродинамічної форми профілів в кожному перерізі решітки та об'єднання їх в просторову форму лопатки. Проектування таких профілів потребує використання різного типу кривих, вирішення питання вибору яких разом з вибором параметрів конструктивного виконання дозволяє варіювати геометрію профілю в широких межах та суттєво впливати на структуру течії, що дає можливість в подальшому ставити задачу оптимізації. При цьому пошук аеродинамічно досконалої форми турбінних решіток потрібно проводити з урахуванням форми меридіональних обводів міжлопаткових каналів, що дозволяє виявити додаткові резерви збільшення економічності турбоустановок.

Таким чином, науково-практична задача розробки методики просторової аеродинамічної оптимізації направляючих решіток осьових турбін шляхом пошуку оптимальних форми профілів та меридіональних обводів міжлопаткових каналів, 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 «Розрахункові дослідження аеродинамічної досконалості елементів проточних частин парових та газових турбін» (ДР № 0111U002267) і госпдоговірних робіт з ПАТ «Турбоатом» (м.Харків): «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», «Багатопараметрична багатокритеріальна оптимізація конструктивних і термогазодинамічних параметрів проточної частини циліндра середнього тиску турбіни К-800-23,5», в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методики проектування аеродинамічно досконалих направляючих апаратів осьових турбін шляхом оптимізації профілю і варіювання його форми вздовж висоти решітки та подальшим проектуванням меридіонального обводу.

Для досягнення мети поставлені задачі:

- провести аналіз основних підходів підвищення ефективності турбінних решіток, а також систематизувати існуючі методи їх проектування;
- розробити методику оптимізації турбінних решіток з використанням кривих різного типу для проектування форми профілів та визначити їх параметри управління;
- провести верифікацію методу розрахунку направляючого апарату осьових турбін з результатами фізичного експерименту;
- провести оптимізацію турбінних профілів і решітки з постійним вздовж висоти лопатки профілем за критерієм якості – мінімум інтегральних аеродинамічних втрат;
- розробити методику побудови турбінної решітки зі змінним вздовж висоти лопатки профілем та провести її оптимізацію;
- розробити метод оптимізації форми периферійних меридіональних обводів міжлопаткового каналу з критерієм якості – мінімум інтегральних втрат.

Об'єкт дослідження – аеродинамічні процеси в напрямних решітках турбомашин.

Предмет дослідження – аеродинамічні характеристики направляючої решітки осової турбіни при розв'язанні оптимізаційної задачі.

Методи дослідження. Розрахунково-теоретичні методи дослідження течії в турбінних решітках ґрунтуються на фундаментальних положеннях теорії гідрогазодинаміки. Оптимальна конструкція турбінної решітки визначалася з використанням теорії планування експерименту з формальною макромоделлю підвищеної точності та КІІт – послідовністю. Характер течії потоку в турбінних решітках, а також його характеристики визначалися з використанням методів обчислювальної гідродинаміки (*CFD*). Побудова моделей для *CFD* – розрахунків здійснювалося за допомогою твердотільного тривимірного комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- дістав подальшого розвитку метод аналітичного проектування та оптимізації профілів турбінних лопаток з використанням кривих Безьє, кубічних інтерполяційних сплайнів і степеневих поліномів, що забезпечує створення аеродинамічно досконалих турбінних профілів;
- отримала подальший розвиток побудова формальних макромоделей (ФММ) на основі повного квадратичного поліному, що дозволяє з великою точністю описувати полімодальні функції для апроксимації показників якості та функціональних обмежень турбомашин ;
- вперше розроблено метод оптимізації периферійних меридіональних обводів напрямних решіток турбінних ступенів із застосуванням *CFD* – розрахунків, що забезпечує зниження інтегральних аеродинамічних втрат;
- вперше показано вплив робочого тіла на форму оптимальних профілів.

Практичне значення одержаних результатів для галузі турбінобудування полягає у розробці методики проектування аеродинамічно досконалих направляючих апаратів осьових турбін шляхом оптимізації форми профілів вздовж висоти лопатки та периферійного меридіонального обводу міжлопатко-

вих каналів. Завдяки розробленій методиці проведена оптимізація направляючого апарату з геометричними параметрами, що відповідають третьому ступеню турбіни К–310–23,5, яка дозволила знизити рівень інтегральних аеродинамічних втрат на 8,4 % в відносних величинах.

Результати дисертаційної роботи використовуються ПАТ «Турбоатом» в процесі проектування і модернізації проточних частин потужних парових турбін (акт впровадження від 17 березня 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», «Теорія решіток» (акт впровадження від 09 березня 2016 г.).

Особистий внесок здобувача. Всі положення і результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведено аналіз способів удосконалення аеродинамічних характеристик турбінних решіток; виявлені найбільш використовувані методи аналітичного профілювання; проведено проектування турбінних профілів за допомогою степеневих поліномів, кривих Безьє, кубічних інтерполяційних сплайнів; для типів кривих, що розглядаються, визначені параметри управління їх формою; проведена багатостороння верифікація вибору розрахункового об'єму і результатів *CFD*-розрахунків із результатами фізичного експерименту; вдосконалена структура формальної макромоделі повного квадратичного поліному при використанні теорії планування експерименту; проведена оптимізація направляючої турбінної решітки з постійним вздовж висоти профілем при використанні розглянутих методів профілювання; проведена оптимізація направляючої решітки зі змінними вздовж висоти лопатки профілями; обґрунтована можливість підвищення ефективності турбінних решіток за допомогою оптимізації периферійних меридіональних обводів з критерієм якості – мінімум аеродинамічних втрат.

Апробація результатів дисертаційної роботи. 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.); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2011 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2012 – 2016); XV Міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалення турбоустановок методами математичного та фізичного моделювання» (м. Харків, 2015 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображено в 13 наукових працях, з них 7 – у наукових періодичних фахових виданнях України (5 – у наукометричних базах даних), 6 – у матеріалах науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації і 6 додатків. Повний обсяг дисертації складає 146 сторінок, серед них 57 рисунків за текс-

том, 6 рисунків на 4 окремих сторінках, 11 таблиць за текстом, списку використаних джерел інформації з 84 найменувань на 9 сторінках, 6 додатків на 6 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі проведено систематизацію та аналіз сучасних підходів зниження аеродинамічних втрат в турбінних решітках.

Визначено, що резерви підвищення ефективності проточних частин турбомашин пов'язані з проектуванням турбінних профілів оптимальної форми, яке досягається шляхом профілювання перерізів вздовж висоти лопатки за допомогою різного роду кривих. Впливати на просторову структуру течії в турбінних решітках також можливо з використанням меридіонального профілювання поверхонь міжлопаткових каналів, пошук аеродинамічно досконалих форм яких дозволяє додатково знизити аеродинамічні втрати.

Проектування принципово нових конструкцій проточних частин на сучасному рівні потребує підходів, що дозволяють отримувати аеродинамічно досконалі профілі та лопатки в цілому шляхом використання оптимізаційних методів.

У другому розділі розроблена методика створення оптимальних турбінних решіток із використанням різного роду кривих для проектування форми профілів та визначені параметри конструктивного виконання.

Задача оптимального проектування турбінних профілів виглядає наступним чином:

$$\vec{Y}^{opt}(\vec{x}_k^{opt}) = \max \vec{Y}(\vec{x}_k), \vec{x}_k \in X, \vec{f}(\vec{x}_k) \in F, \quad (1)$$

$$\vec{Y}(\vec{Y}_1(\vec{x}_k), \vec{Y}_2(\vec{x}_k), \dots, \vec{Y}_n(\vec{x}_k)),$$

де \vec{Y} – вектор цільових функцій; \vec{x}_k – вектор конструктивних параметрів; \vec{f} – вектор обмежень; X, F – області існування конструктивних параметрів та обмежень. Тобто, необхідно знайти таке рішення задачі \vec{x}_k^{opt} , котре забезпечує екстремальне значення цільових функцій \vec{Y}^{opt} , що знаходяться в діапазонах існування векторів параметрів управління і обмежень.

Методику оптимального проектування турбінних решіток, засновану на поетапному вирішенні поставленої задачі, представлено в вигляді блок-схеми, на кожному етапі якої вирішується конкретна задача (рис. 1).

Задачею першого етапу є отримання форми турбінних профілів з використанням кривих Безьє, кубічних інтерполяційних сплайнів, степеневих поліномів та визначення їх параметрів конструктивного виконання. Наступним етапом є побудова турбінної лопатки з отриманих на попередньому етапі плоских перерізів.



Рисунок 1 – Блок-схема методики оптимізації турбінної решітки

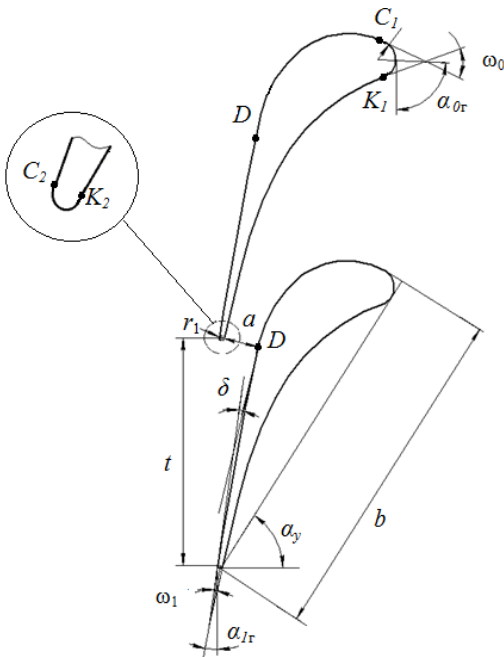


Рисунок 2 – Параметрична модель турбінного профілю

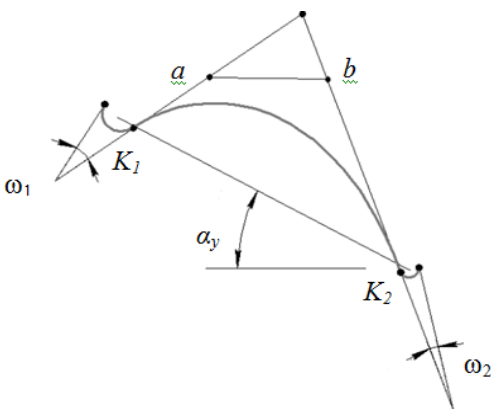


Рисунок 3 – Крива Безьє, що опирається на полігон з трьох прямих вого мінімуму. Таке положення точок знаходиться за допомогою умови мінімуму максимальної кривизни

Методологічні дослідження включають налаштування *CFD* пакета та обґрунтованість розташування площини заміру за вихідними кромками. На етапі верифікації здійснюється порівняння результатів числових розрахунків з результатами фізичних експериментів. Заключним етапом є проведення оптимізації турбінної решітки та порівняння отриманих результатів з вихідною конструкцією.

Побудова турбінного профілю здійснюється за допомогою двох окружностей, що описують вхідну та вихідну кромку, а також однієї або декількох кривих високих порядків для опису сторін тиску та розрідження.

Вихідними даними для побудови профілю є (рис. 2): α_{0r}, α_{1r} – геометричні кути входу та виходу потоку з турбінної решітки; b – хорда профілю; t – крок решітки; a – горло решітки; α_y – кут встановлення профілю; δ – кут відгину вихідної кромки; r_1, r_2 – радіуси вхідної та вихідної кромки; ω_{1c}, ω_{2c} – кути загострення вхідної та вихідної кромки; f – площа перерізу профілю.

За допомогою заданих параметрів визначаються положення точок сполучення сторін тиску та розрідження з вхідною та вихідною кромкою (точки K_1, K_2, C_1, C_2), а для сторони тиску – і точку горла (D) та граничні умови в цих точках.

Для побудови профілю кривими Безьє використовується полігон з трьох прямих (рис. 3), що дозволяє зменшити значення максимальної кривизни:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n P_i \cdot b_i^n(t), \quad 0 \leq t \leq 1, \quad (2)$$

де P_i – радіус-вектор опорних точок; n – число опорних точок мінус одиниця; $b_i^n(t)$ – поліноми Бернштейна; $i = 0, 1, \dots, n$.

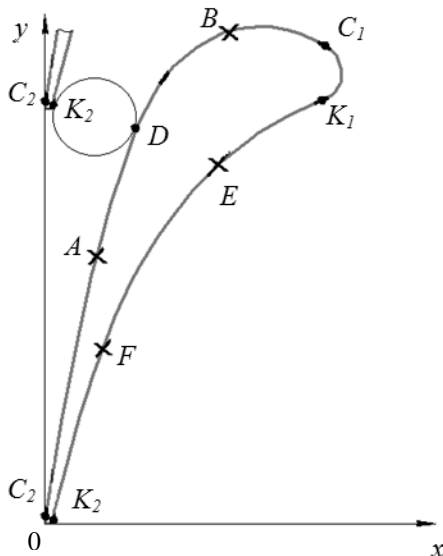
Існує положення точок a та b , при якому максимальна кривизна кривої досягає можливого мінімуму.

$$\max |k| \rightarrow \min, \quad (3)$$

де k – значення кривизни в точці кривої.

Параметрична модель профілю складається з двох кривих Безьє, котрі описують сторону розрідження (від вхідної кромки до точки горла та від точки горла до вихідної кромки відповідно), однієї кривої Безьє, що описує сторону тиску, та двох окружностей для опису вхідної та вихідної кромки.

Варійованими параметрами, при проектуванні профілів турбінних решіток кривими Безьє, виступають: α_{0r} , α_{1r} – геометричні кути входу та виходу потоку з турбінної решітки; ω_{1c} , ω_{2c} – кути загострення вхідної та вихідної кромки; α_y – кут встановлення профілю при постійному кроці та горлі решітки; δ – кут відгину вихідної кромки; r_1 , r_2 – радіуси вхідної та вихідної кромки; t/b – відносний крок решітки.



● – основні вузлові точки;
 X – проміжні вузлові точки
 Рисунок 4 – Побудова профілю за допомогою кубічних інтерполяційних сплайнів

Параметричну модель при проектуванні турбінних профілів за допомогою кубічних інтерполяційних сплайнів

$$y_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + \frac{c_i}{2}(x - x_i)^2 + \frac{d_i}{6}(x - x_i)^3, \quad (4)$$

де $(x - x_i)$ – відстань між вузлами сплайну, a_i , b_i , c_i , d_i – коефіцієнти сплайну, $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$, зручно представити у вигляді двох кривих, котрі описують сторону розрідження (від вхідної кромки до точки горла та від точки горла до вихідної кромки відповідно), однієї кривої, що описує сторону тиску, та двох окружностей, які описують вхідну та вихідну кромки. Для опису вихідної форми профілю до основних вузлів (точки C_1 , D , C_2 , K_1 , K_2) додаються проміжні точки (наприклад, точки A , B , E , F), положення яких виступають в якості варійованих параметрів (рис. 4).

Визначено, що при створенні обрисів профілю на основі *степеневих поліномів*

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \dots + a_nx^n, \quad (5)$$

де a_n – невідомі коефіцієнти кривої, x – змінна, y – значення функції, для варіювання форми профілю турбінної лопатки в широких межах його геометрії необхідно щоб для побудови його сторони тиску використовувався поліном не нижче третього порядку, а сторони розрідження – не нижче п'ятого порядку.

Для достатньої можливості зміни форми профілю використовується поліном п'ятого степеня для сторони тиску і восьмої степені – для сторони розрідження.

В якості параметрів управління формою турбінного профілю використовуються похідні високих порядків в точках сполучення кривих з вхідною та вихідною кромкою та в точці горла. Коефіцієнти поліному визначаються по заданим граничним умовам та параметрам управління.

Відповідність площі отриманих профілів вихідному досягається відповідною зміною кута загострення вихідної кромки.

Створені методики побудови геометрії турбінних решіток та визначені конструктивні параметри для розглянутих типів кривих дозволяють варіювати форму профілю в широких межах та в подальшому ставити і вирішувати оптимізаційну задачу.

В третьому розділі розрахунковим шляхом обґрунтовано вибір розташування площин, що визначають область дослідження з використанням *CFD* - методів, проведена багатостороння детальна верифікація результатів *CFD* - розрахунків із результатами фізичних експериментів.

Визначення аеродинамічних втрат в направляючому апараті необхідно проводити в площині, яка повною мірою охоплює зміну структури течії в турбінній решітці, тобто в площині, де досягається незмінність втрат при збільшенні відстані від фронту вихідних кромek решітки. Згідно з раніше отриманими шляхом експериментальних досліджень рекомендаціями в ВАТ «НВО ЦКТИ» (м. С. Петербург), площина визначення втрат повинна розташовуватись на відстані $1/7$ хорди або величини горла.

При проведенні фізичного експерименту стабілізація втрат досягається вилученням накопиченого на границях підвідного каналу приграничного шару за допомогою відсічних пластин.

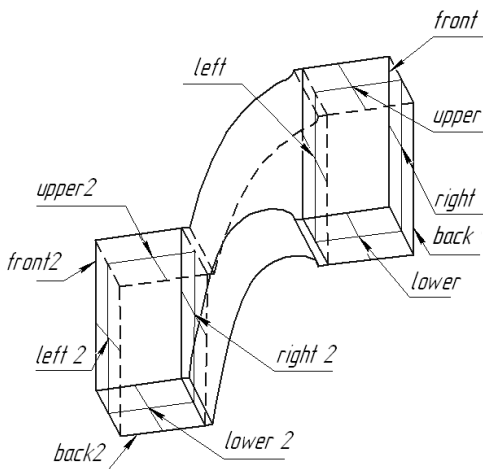


Рисунок 5 – Запропонована модель розрахункової області

Моделювання відсічних пластини, а отже більш точне моделювання фізичного експерименту, при проведенні числових досліджень досягається шляхом використання моделі розрахункового об'єму (рис. 5).

Модель включає в себе три домени: вхідний, домен міжлопаткового каналу, та вихідний домен. Формування прикордонного шару відбувається тільки в середньому домені, який моделює міжлопатковий канал. На торцевих поверхнях вхідного та вихідного домену задається умова ковзання. Результати розрахунків показали що, використання моделі розрахункового об'єму з запропонованими трьома до-

менами дозволяє досягти стабілізації інтегральних втрат, що виникають в турбінних решітках, за вихідними кромками.

Верифікація результатів числових розрахунків з результатами фізичного експерименту проводилась шляхом порівняння значення втрат по висоті направляючої решітки, а також порівнянням профільних втрат робочої решітки.

Досліджуваною направляючою решіткою являється решітка осьової турбіни з профілями типу ТН-2. Граничні умови: повний тиск на вході в решітку $P_0^* = 11630$ мм. вод. ст., повна температура на вході в решітку $T_0^* = 40$ °С, статичний тиск на виході з решітки $P_1 = 10330$ мм. вод. ст. Значен-

ням граничних умов відповідає число Маха $M=0,41$ та число Рейнольдса $Re=4 \times 10^5$. Робоче тіло – повітря.

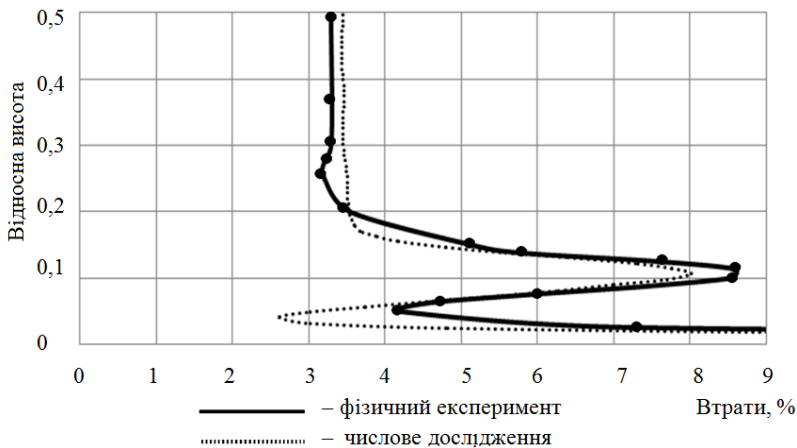


Рисунок 6 – Розподіл втрат вздовж висоти лопатки

дження робочих решіток виступають дві решітки з профілями типу P-2 та 1ММК. Профіль 1ММК являється результатом постановки задачі оптимізації конструкції профілю P-2 з функцією цілі – мінімум максимальної кривизни (3).

Таблиця 1 – Профільні втрати робочих решіток при безударному куті натікання

Профіль	P2	1ММК
Втрати (експеримент), %	3,35	3,16
Втрати (CFD), %	4,17	4,11

при розв'язанні оптимізаційної задачі.

Рівність витрати робочого тіла через вихідну та оптимальну решітку дотримується шляхом варіювання кута встановлення отриманого оптимального результату з функцією цілі – мінімум інтегральних втрат. Вибір даного способу обумовлений результатами розрахункових досліджень в постановках оптимізаційної задачі з різним дотриманням заданої витрати: включення витрати в оптимізаційний цикл, збереження витрати за допомогою зміни кута встановлення та висоти решітки.

Таким чином, CFD - розрахунки з використанням запропонованої моделі розрахункової об'єму міжлопаткового каналу турбінної решітки достатньо точно моделюють фізичні процеси течії робочого тіла, що дозволило перейти до етапу оптимізації профілів та лопаток.

В четвертому розділі проведено просторову оптимізацію прямої направляючої решітки постійного вздовж висоти перерізу з використанням кривих Безьє, кубічних інтерполяційних сплайнів та степеневих поліномів, а також оптимізацію направляючої решітки зі змінними вздовж висоти лопатки профілями за допомогою кривих Безьє.

Пошук оптимального рішення відбувається за допомогою теорії планування експерименту, що ґрунтується на заміні вихідної математичної моделі

Порівняння результатів фізичного експерименту, проведеного на стендах кафедри турбінобудування НТУ «ХП», і числових розрахунків (рис. 6), отриманих з використанням CFD та запропонованої моделі розрахункової області, показують достатнє співпадання, як в ядрі потоку, так і в області вторинних втрат.

Об'єктами дослідження

дослідження робочих решіток виступають дві решітки з профілями типу P-2 та 1ММК. Профіль 1ММК являється результатом постановки задачі оптимізації конструкції профілю P-2 з функцією цілі – мінімум максимальної кривизни (3). Результати фізичного експерименту та числового розрахунку при безударному куті натікання (табл. 1) показують, що CFD - розрахунок дає декілька завищені втрати, але при цьому тенденція зниження втрат зберігається, що є ключовим моментом

цільової функції її апроксимаційною або інтерполяційною залежністю у вигляді повного квадратичного поліному (формальною макромоделлю (ФММ)).

Опис вихідних математичних моделей цільових функцій, що мають велику кількість перегинів та екстремумів, досягається використанням ФММ наступного виду

$$y(q) = A_0 + \sum_{i=1}^n \left(a_{ik} + \left(b_{ik} + \left(\frac{c_{ik}}{2} + \Delta q_{ik} \cdot \frac{d_{ik}}{6} \right) \Delta q_{ik} \right) \Delta q_{ik} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n A_{ij} q_i q_j, \quad (6)$$

де a_{ik} , b_{ik} , c_{ik} , d_{ik} – коефіцієнти кубічного сплайну поточної (k -ї) інтерполяційної ділянки i -ї незалежної змінної. Для кожної незалежної нормованої змінної q_i існує m інтерполяційних ділянок в діапазоні між -1 та $+1$; Δq_{ik} – відстань між поточним значенням q_i і координатою початкового вузла k -ї ділянки сплайну, у котрого значення координати q_i знаходиться між координатами початкового (k -го) і кінцевого ($k+1$ – го) його вузла; $k=1, 2, \dots, m$.

Перевірка достовірності уточненої ФММ виконується шляхом порівняння з тестовою полімодальною функцією

$$Z = 2 + 0.1X^2 + 0.1Y^2 - \sin X - \sin Y \quad (7)$$

та формальною макромоделлю повного квадратичного поліному (рис. 7).

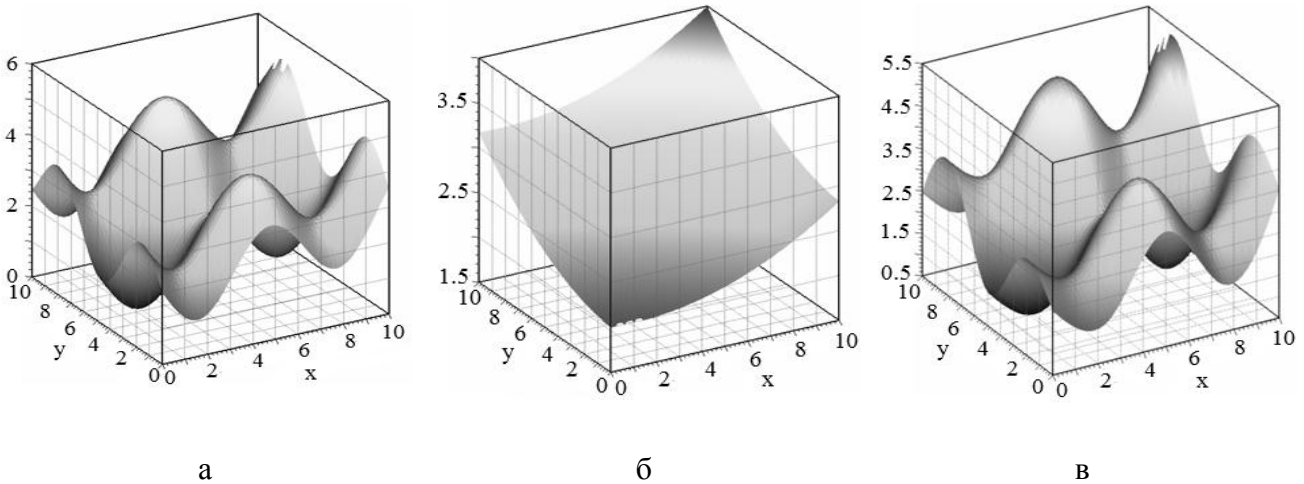


Рисунок 7 – Порівняння точності апроксимації тестової функції формальними макромоделями: а – тестова мультимодальна функція (7); б – апроксимація функції (7) ФММ повного квадратичного поліному; в – апроксимація функції (7) ФММ виду (6).

Досліджуваним об'єктом при рішенні оптимізаційної задачі є направляюча решітка з високоефективними атласними профілями типу ТС-1А (ТН-4), що по своїм геометричним розмірам відповідає третьому ступеню турбіни К-310-23,5. Граничні умови: повний тиск на вході в решітку $P_0^* = 16,15$ МПа, повна температура на вході в решітку $T_0^* = 457$ °С, статичний тиск на виході з решітки $P_1 = 13,75$ МПа. Робоче тіло – перегрітий пар. При розрахунках використовувалась гексагональна сітка з кількістю елементів близько 2,5 млн. Параметр y^+ на всіх твердих поверхнях не перевищує 2. Використовується пряма решітка.

Рішення задачі просторової оптимізації направляючої решітки з постійним вздовж висоти лопатки профілем при проектуванні його кривими Безье дозволило отримати вигравш близько 7% в відносних величинах при збереженні витрати робочого тіла рівній вихідному варіанту (табл. 2). Варійованими пара-

метрами виступали: α_{1r} – геометричний кут виходу потоку з турбінної решітки; ω_1, ω_2 – кути загострення вхідної та вихідної кромки; α_y – кут встановлення профілю при постійному кроці та горлі решітки; δ – кут відгину вихідної кромки.

Таблиця 2 – Результати оптимізації турбінної решітки, спроектованої різними кривими

Профіль \ Характеристики	Вихідний	Оптимальний (криві Безьє)	Оптимальний (кубічні інтерполяційні сплайни)	Оптимальний (степеневі поліноми)
Втрати, %	3,034	2,833	2,891	2,889
Витрата, кг/с	2,051	2,051	2,052	2,052

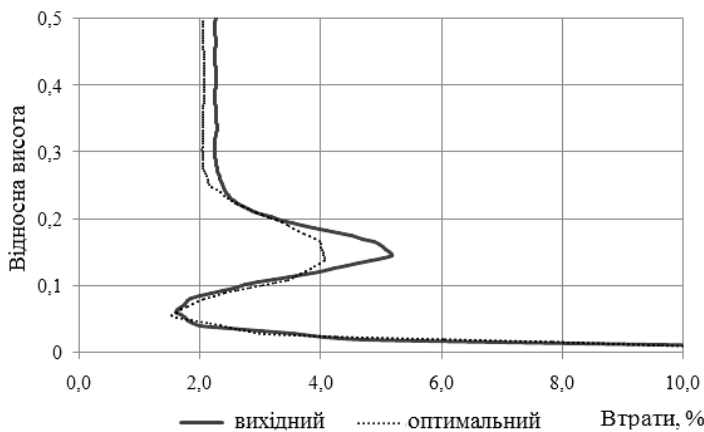


Рисунок 8 – Розподіл втрат вздовж висоти решітки

тим самим знизило перетікання в приторцевій області.

Використання *кубічних інтерполяційних сплайнів* для пошуку оптимальної форми направляючої решітки також дозволило отримати решітку з інтегральними аеродинамічними втратами нижче вихідного варіанту на 4,7% в відносних величинах (табл. 2).

За варійовані параметри взяті координати допоміжних вузлів сплайну відносно осей x та y ($x_A, y_A, x_B, y_B, x_E, y_E, x_F, y_F$). Отримана форма профілю (рис. 9 б) має випуклість на стороні тиску, що забезпечує підвищення конфузорності у вхідній частині міжлопаткового каналу і сприяє стабілізації відривних явищ та зниженню аеродинамічних втрат вздовж висоти лопатки турбінної решітки.

Варійованими параметрами при рішенні оптимізаційної задачі з використанням *степеневих поліномів* виступають похідні другого порядку в точках сполучення поліномів з вхідною та вихідною кромками ($y''_{c1}, y''_{c2}, y''_{k1}, y''_{k2}$), а для спинки – і в точці горла (y''_D). Вихідні значення варійованих параметрів визначались за допомогою значень кривизни вихідного профілю в даних точках. Форма профілю відрізняється від вихідного, як на стороні розрідження, так і на стороні тиску (рис. 8 в). Зниження інтегральних аеродинамічних втрат досягнуто по всій висоті решітки і в даній постановці інтегрально склало 4,8%.

Форма оптимального профілю суттєво відрізняється від вихідного варіанту (рис. 9 а). Зниження втрат при обтіканні оптимальної турбінної решітки досягнуто завдяки зменшенню втрат, як в ядрі потоку, так і в області вторинних течій (рис. 8). Зміна форми профілю призвела до зменшення градієнту тиску між сторонами тиску та розрідження міжлопаткового каналу, і

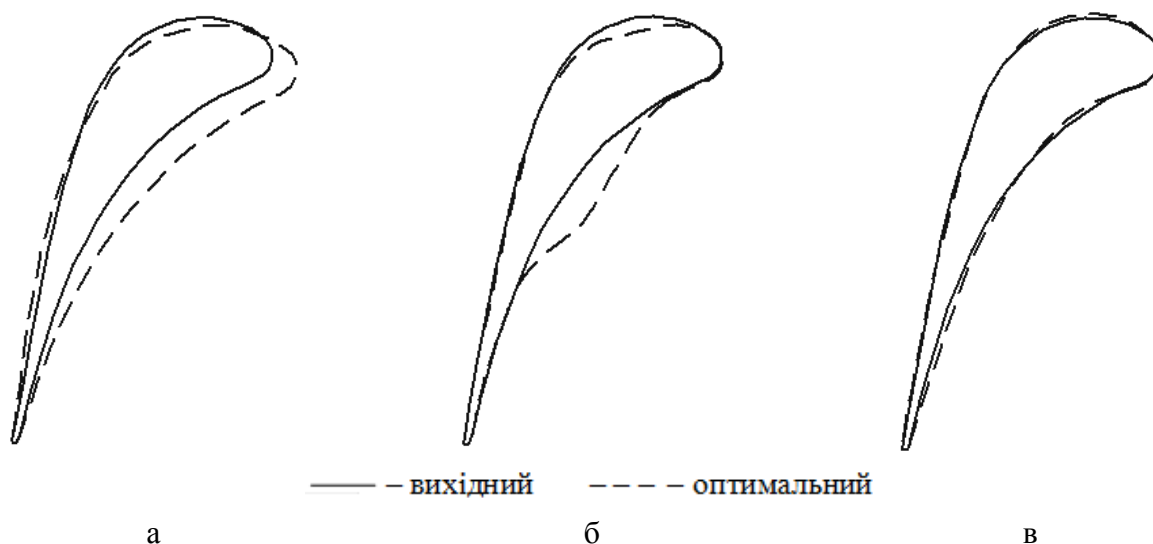


Рисунок 9 – Форми оптимальних профілів, отриманих при проектуванні їх: а – кривими Безьє; б – кубічними інтерполяційними сплайнами; в – степеневими поліномами

Вихідний та один із оптимальних варіантів також було *CFD* досліджено з використанням повітря в якості робочого тіла. Виявлено, що тенденція підвищення ефективності у оптимального варіанту не зберігається, а саме, втрати решітки з оптимальною геометрією, отриманою при обтіканні її перегрітим паром, більше втрат вихідного варіанту. Причиною цього є неоднакові процеси формування приграничного шару для різних робочих тіл, що пов'язане зі значеннями коефіцієнту в'язкості, які відрізняються на порядок. Це говорить про необхідність проведення оптимізації елементів проточних частин турбомашин для реального робочого тіла.

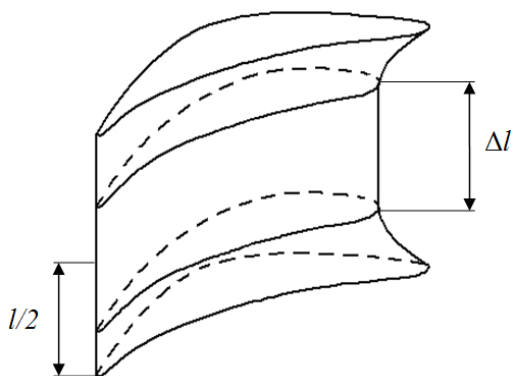


Рисунок 10 – Модель турбінної лопатки зі змінним вздовж висоті профілем

Результати просторової оптимізації направляючої турбінної решітки з постійним вздовж висоти лопатки профілем дозволили припустити, що використання направляючої решітки зі змінним вздовж висоти лопатки профілем може дати дещо більший вигравш.

Запропонована модель турбінної лопатки (рис. 10) виглядає наступним чином: на ділянці в ядрі потоку використовується профіль постійної форми і відмінний від нього профіль в приторцевій області.

Побудова профілів в кожному перерізі відбувається за допомогою кривих Безьє. Так як решітка, що розглядається пряма, форма лопатки симетрична відносно середнього по висоті перерізу.

За варійовані параметри прийняті: на середньому по висоті перерізі – $\alpha_{1гс}$ – геометричний кут виходу потоку з турбінної решітки; $\omega_{1с}$, $\omega_{2с}$ – кути загострення вхідної та вихідної кромки; α_{yc} – кут встановлення при постійному кроці та горлі решітки; δ_c – кут відгину вихідної кромки; в приторцевій області – $\alpha_{1гт}$ – геометричні кути входу та виходу потоку з турбінної решітки; $\omega_{1т}$, $\omega_{2т}$ –

кути загострення вхідної та вихідної кромки; α_{yT} – кут встановлення при постійному кроці та горлі решітки; δ_T – кут відгину вихідної кромки; Δl – довжина ділянки в ядрі потоку, на якій профіль залишається незмінним.

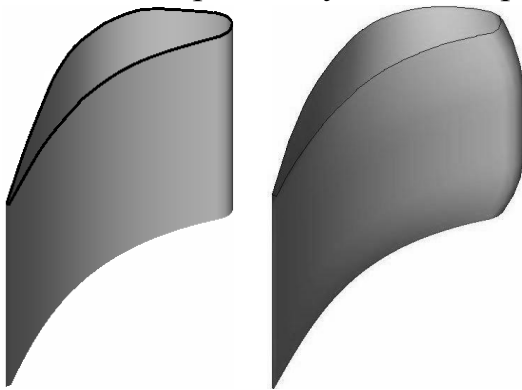


Рисунок 11 – Турбінна лопатка

В результаті отримана решітка (рис. 11), кореневий переріз якої близький до вихідного варіанту, а переріз в ядрі потоку суттєво відрізняється від нього. Використання змінного по висоті профілю дозволяє зменшити градієнт тиску в прикореневій області міжлопаткового каналу, що в свою чергу призводить до зменшення втрат від перетікання потоку зі сторони тиску до сторони розрідження (рис. 12). Зниження інтегральних аеродинамічних втрат в даній постановці склало 7% в відносних величинах

при збереженні витрати робочого тіла на рівні вихідного варіанту.



Рисунок 12 – Лінії току в приторцевій області міжлопаткового каналу

Таким чином, з використанням ФММ підвищеної точності для коротких лопаток ($b/l = 2,5$) з постійним та змінними вздовж висоти лопатки профілями показана можливість зменшення інтегральних аеродинамічних втрат при обтіканні їх робочим тілом.

У п'ятому розділі описаний метод оптимізації периферійних меридіональних обводів направляючих решіток з використанням *CFD*, проведена оптимізація направляючих решіток з розкриттям та без нього.

Впливати на структуру течії в міжлопатковому каналі дозволяє меридіональне профілювання його торцевих поверхонь. Відзначено, що використання випуклої форми меридіонального обводу невеликої кривизни в коротких решітках призводить до зменшення інтегральних аеродинамічних втрат в порівнянні з циліндричною формою. При цьому необхідним являється зберігання радіальної складової потоку на вході та виході із каналу рівною нулю.

Метод оптимізації включає наступні кроки:

- визначення параметрів управління формою меридіонального обводу;
- завдання діапазонів варіювання параметрів управління;
- формування плану експерименту;
- побудова геометрії меридіонального обводу міжлопаткового каналу згідно точок плану та їх *CFD* - розрахунок;
- створення ФММ цільової функції;
- визначення оптимального варіанту форми меридіонального обводу по ФММ;

- контрольний *CFD* - розрахунок оптимальної форми меридіонального обводу, отриманого по ФММ;
- порівняння результатів розрахунку по ФММ та *CFD*;

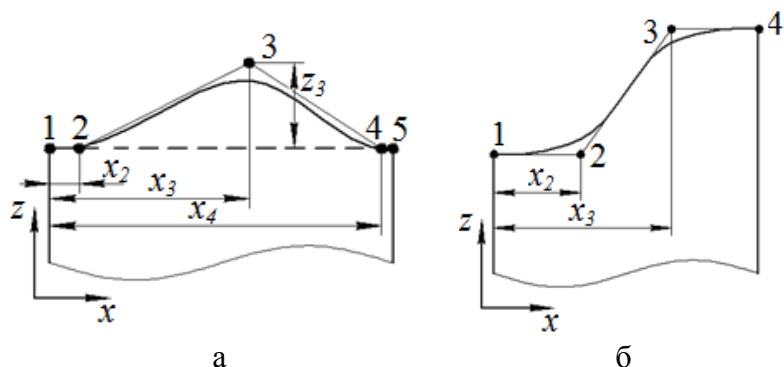


Рисунок 13 – Проектування меридіональних обводів кривими Безьє: а – решітка без розкриття; б – решітка з розкриттям

що варіюються.

Варійованими параметрами з урахуванням граничних умов на вході та виході виступають координати опорних точок кривих Безьє (рис. 13): для решітки без розкриття – положення точок 2 та 4 уздовж координати x (x_2 , x_4), та положення точки 3 уздовж координати x та z (x_3 , z_3); для решітки з розкриттям – положення точок 2 та 3 уздовж координати x (x_2 , x_3).

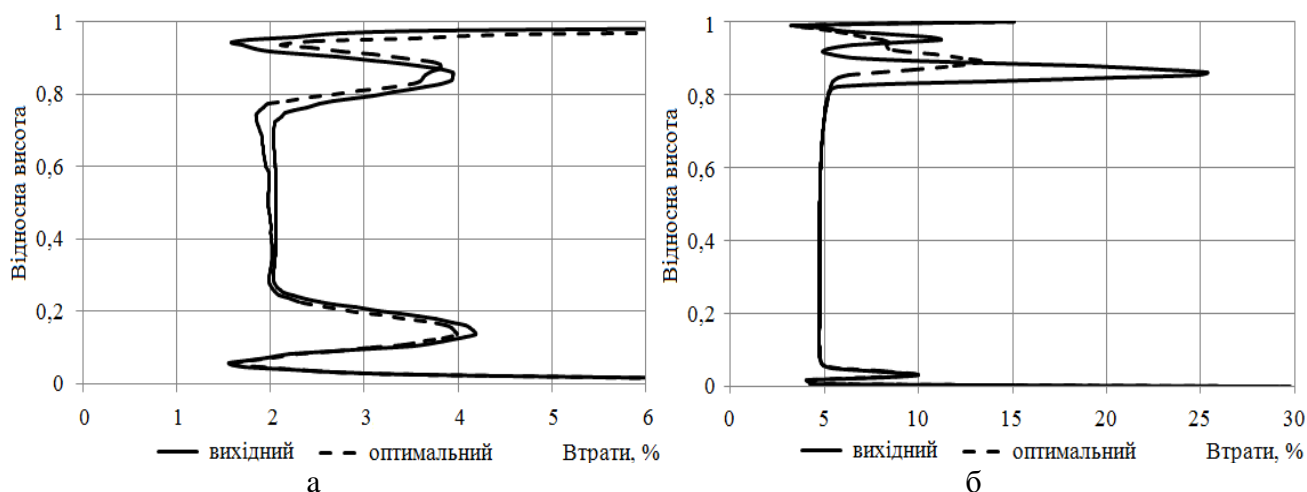


Рисунок 14 – Розподіл втрат вздовж висоти решітки: а – решітка без розкриття; б – решітка з розкриттям

Досліджуваним об'єктом при вирішенні задачі оптимізації периферійного меридіонального обводу міжлопаткового каналу решітки без розкриття є направляюча решітка з профілями, отриманими з використанням кривих Безьє.

Виграш в даній постановці склав 1,4 % в відносних величинах. Зниження величини інтегральних втрат досягнуто завдяки зменшенню, як піку вторинних втрат, так і профільних втрат вище середнього по висоті перерізу (рис. 14 а).

Ціль оптимізації меридіонального обводу решітки з розкриттям – зменшення втрат від вторинних течій для відносно довгих лопаток. Для спрощення задачі побудовано лопатку з постійним по висоті профілем. Кут розкриття ре-

Побудова форми меридіонального обводу виконується з використанням кривої Безьє четвертого порядку для решіток без розкриття та кривої Безьє третього порядку для решіток з розкриттям, що забезпечує зміну форми меридіонального обводу в широких межах його геометрії при мінімальній кількості параметрів,

шітки становить близько 45° . Граничні умови: $P_0^* = 1,2$ атм, $T_0^* = 40^\circ\text{C}$, $P_1 = 1$ атм. Робоче тіло – повітря.

Вирішення оптимізаційної задачі дозволило запобігти появі вихрової структури у вхідній частині решітки (рис. 15) і тим самим значно зменшити втрати від вторинних течій в периферійній області решітки (рис. 14 б). Для довгих лопаток, на відміну від коротких, використання оптимальної форми периферійного меридіонального обводу не впливає на втрати в ядрі потоку.

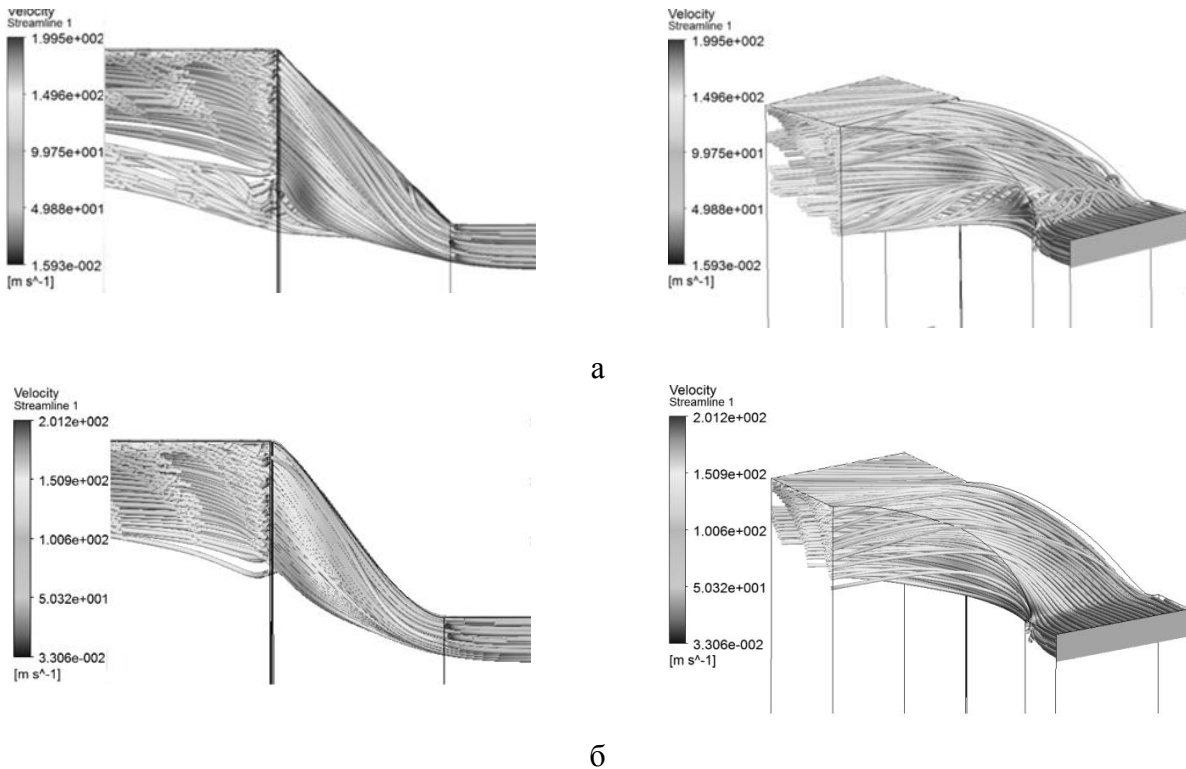


Рисунок 15 – Лінії току в периферійній частині міжлопаткового каналу: а – вихідний варіант; б – оптимальний варіант

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу розробки методики створення на основі *CFD* – методів оптимальних направляючих апаратів осьових турбін шляхом варіювання форми профілю вздовж висоти та оптимізації меридіональних обводів.

Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз основних шляхів підвищення ефективності турбінних ступенів за рахунок викривлення просторової форми лопатки, зміни форми профілю решітки та інші. Результати аналізу показали доцільність створення методики просторової аеродинамічної оптимізації напрямних решіток осьових турбін шляхом пошуку оптимальних форми профілів та меридіональних обводів міжлопаткових каналів.

2. Проаналізовано застосування різних кривих для опису форми профілю (криві Безьє, кубічні інтерполяційні сплайни, степеневі поліноми). Для кожної

кривої обрані параметри управління, що дозволяють в широких межах варіювати форму профілю та надалі ставити і вирішувати оптимізаційну задачу.

3. Розрахунковим шляхом обґрунтовано вибір розташування площин, що визначають область дослідження з використанням *CFD* – методів та запропоновано нову її структуру. Проведена багатостороння детальна верифікація результатів *CFD* розрахунків з результатами фізичних експериментів, яка показала не тільки хороше моделювання *CFD* – програмою фізичних процесів в турбінних решітках, а й можливість отримання оптимальних форм турбінних профілів. Показано, що найбільш ефективним при постановках задачі оптимізації за критерієм якості аеродинамічних втрат є збереження пропускної здатності решітки шляхом зміни кута установки профілю.

4. Проведено оптимізацію направляючого апарату осьової турбіни в двовимірній (функція цілі – профільні втрати) та тривимірній постановці (функція цілі – інтегральні втрати) з різними методами побудови обводу профілю. Аналіз результатів оптимізації показав, що найбільше зниження втрат, при постановці задачі оптимізації, досягається при використанні в якості базових кривих Безье. Зниження втрат в даній постановці склало 7% в відносних величинах.

5. Вперше показано вплив робочого тіла на форму оптимальних профілів.

6. Запропоновано методику побудови турбінної решітки змінного по висоті профілю з подальшою її оптимізацією. Показано, що застосування турбінних лопаток зі змінним по висоті профілем при малих висотах решітки дозволяє підвищити її ефективність.

7. Запропоновано метод оптимізації форми периферійних меридіональних обводів, як для циліндричних напрямних решіток, так і з розкриттям, які показали їх істотний вплив на структуру течії в решітці. Проведена оптимізація меридіональних обводів для решіток з розкриттям і без нього, яка виявила додаткові резерви зниження втрат в турбінних решітках.

8. Результати дисертаційної роботи використовуються в процесі проектування нових і модернізації існуючих потужних парових турбін виробництва ПАТ «Турбоатом» (м. Харків) та в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Баранник В.С. К вопросу об оптимизации формы плоских турбинных профилей [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, М.В. Бурлака, В.С. Баранник // Вісник Національного технічного університету «ХП». – Харків: НТУ «ХП». – 2011. – №5. – С. 51 – 54.

*Здобувачем проведено порівняння результатів оптимізації турбінних профілів при їх потенціальному обтіканні та обтіканні потоком в'язкого робочого тіла. Показана можливість підвищення аеродинамічної ефективності направляючого апарату осьової турбіни за допомогою *CFD* програм при побудові профілів кривими Безье.*

2. Баранник В.С. Пространственная оптимизация профиля лопатки прямой турбинной решетки [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, М.В. Бурлака, В.С. Баранник // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №8. – С. 6 – 10.

Здобувачем розроблено модель розрахункового об'єму, що дозволяє врахувати розміри відсічних пластин та визначити відстань площини замірів від фронту вихідних кромок.

3. Баранник В.С. Повышение точности формальной макромодели при планировании эксперимента [Текст] / А.В. Бойко, А.П. Усатый, В.С. Баранник // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №12. – С. 5 – 9.

Здобувачем розроблено програму пошуку оптимального розв'язку за допомогою формального макромодельовання, що дозволяє з достатньою точністю описувати полімодальні цільові функції.

4. Баранник В.С. Пространственная оптимизация лопатки прямой турбинной решетки с изменением профиля по высоте [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, В.С. Баранник // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №14. – С. 5 – 10.

Здобувачем проведено просторову оптимізацію направляючої решітки зі змінним вздовж висоти лопатки профілем, проведено аналіз отриманих результатів та причини зниження втрат в оптимальній решітці.

5. Баранник В.С. Влияние способа сохранения пропускной способности направляющей решетки на результаты пространственной оптимизации [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, В.С. Баранник // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №11. – С. 30 – 34.

Здобувачем проведено порівняння результатів оптимізації направляючого апарату осевої турбіни за різними способами збереження витрати робочого тіла крізь решітку.

6. Баранник В.С. Особенности выбора геометрических углов входа и углов установки в задачах оптимального проектирования осевых турбин [Текст] / А.В. Бойко, А.П. Усатый, В.С. Баранник // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – №15. – С. 17 – 22.

Здобувачем проведено побудову профілів робочої решітки з різними величинами геометричних кутів входу потоку в решітку та різними кутами встановлення профілів.

7. Баранник В.С. Влияние формы меридионального обвода направляющего аппарата на характер течения в сопловой решетке турбин [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, В.С. Баранник, А.Р. Хамидулин // Проблеми машинобудування. – Харків: ПМаш ім. А.М. Підгорного. – 2015. – Т. 18. № 4. – С. 13 – 18.

Здобувачем розроблено метод оптимізації форми периферійних меридіональних обводів та проведено оптимізацію периферійного меридіонального обводу направляючого апарату ступеня низького тиску.

8. Бараннік В.С. Вдосконалення турбінних профілів за допомогою CFD програм [Текст] / А.В. Бойко, М.В. Бурлака, В.С. Бараннік // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – С. 216.

Здобувачем проведено оптимізацію турбінних профілів за критерієм якості – мінімум профільних втрат.

9. Бараннік В.С. До питання про просторову оптимізацію профілю лопатки прямої турбінної решітки [Текст] / А.В. Бойко, Ю.М. Говорущенко, М.В. Бурлака, В.С. Бараннік // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – С. 233.

Здобувачем проведено оптимізацію направляючої решітки осевої турбіни постійного вздовж висоти лопатки профілем за критерієм якості – мінімум інтегральних втрат.

10. Бараннік В.С. Просторова оптимізація лопатки прямої турбінної решітки по декількох перерізах [Текст] / А.В. Бойко, Ю.М. Говорущенко, В.С. Бараннік // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – С. 264.

Здобувачем запропонована модель турбінної решітки, лопатка якої складається з ділянку з постійним профілем та відмінним від нього профілем в приторцевих зонах, визначено параметри управління формою профілів.

11. Бараннік В.С. Підвищення точності формальних макромоделей повного квадратичного полінома [Текст] / А.В. Бойко, А.П. Усатий, В.С. Бараннік // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – С. 268.

Здобувачем проведено порівняння результатів апроксимації тестової поліномодальної функції формальними макромоделями повного квадратичного полінома та її уточненого варіанту.

12. Бараннік В.С. Порівняння результатів просторової оптимізації при різних способах збереження обмежень [Текст] / А.В. Бойко, Ю.М. Говорущенко, В.С. Бараннік // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – С. 255.

Здобувачем отримано результати просторової оптимізації направляючої решітки за умови обмеження витрат робочого тіла, збереженням робочого тіла шляхом зміни кута встановлення та висоти решітки.

13. Бараннік В.С. Особливості оптимізації кутів встановлення і геометричних кутів входу робочих решіток [Текст] / А.В. Бойко, А.П. Усатий, В.С. Бараннік // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – С. 242.

Здобувачем проведено розрахунки з визначення втрат в решітках, що досліджувались, та проведено аналіз результатів.

АНОТАЦІЇ

Бараннік В.С. Просторова аеродинамічна оптимізація направляючої решітки осьової турбіни. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. – національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2016.

Дисертація присвячена розробці методики просторової аеродинамічної оптимізації напрямних решіток осьових турбін шляхом пошуку оптимальних форми профілів та меридіональних обводів міжлопаткових каналів. Використання даної методики дозволяє при постановці оптимізаційної задачі врахувати додаткові резерви підвищення ефективності.

При реалізації цієї методики було виконано проектування турбінних профілів з використанням різного роду кривих. Для кожного типу кривої визначені її параметри управління, що дозволяють в широких межах варіювати геометрію профілю. Достовірність отриманих результатів підтверджується проведеною верифікацією на направляючій та робочій решітці.

На основі розробленої методики проведено оптимізацію направляючої решітки третього ступеня потужної парової турбіни з постійним по висоті профілем при побудові його різними типами кривих. Аналіз результатів оптимізації показав, що найбільше зниження інтегральних втрат склало 7% у відносних величинах. Подальша оптимізація периферійного меридіонального обводу за допомогою розробленого методу дозволила збільшити цю величину на 1,4%. Використання лопатки перемінного по висоті профілю при постановці оптимізаційної задачі також дозволяє знизити інтегральні втрати.

Ключові слова: направляюча решітка осьової турбіни, меридіональний обвід, методика просторової оптимізації, макромоделювання, інтегральні втрати, *CFD* розрахунки.

Баранник В.С. Пространственная аэродинамическая оптимизация направляющей решетки осевой турбины. 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, 2016.

Диссертация посвящена разработке методики пространственной аэродинамической оптимизации направляющих решеток осевых турбин путем поиска оптимальных формы профилей и меридиональных обводов межлопаточных каналов. Использование данной методики позволяет при решении оптимизационной задачи учесть дополнительные резервы повышения эффективности.

При реализации этой методики было выполнено проектирование турбинных профилей с использованием различного рода кривых. Для каждого типа кривой определены ее параметры управления, позволяющие в широких пределах варьировать геометрию профиля и в дальнейшем ставить оптимизационную задачу. Достоверность полученных результатов подтверждается проведенной верификацией на направляющей и рабочей решетке. Физические эксперименты проведены на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ». Более точное моделирование физического эксперимента достигнуто путем использования модели расчетной области, которая состоит из трех доменов: входного, выходного и домена межлопаточного канала.

Поиск оптимального варианта осуществлялся с использованием теории планирования эксперимента и ЛПт – последовательности. Для описания полиномиальных целевых функций исходная формальная макро модель в виде полного квадратичного полинома была уточнена путем замены суперпозиции параболы на суперпозицию кубического интерполяционного сплайна.

На основе разработанной методики проведена оптимизация направляющей решетки третьей степени мощной паровой турбины с постоянным по высоте профилем при построении его различными типами кривых. Анализ результатов оптимизации показал, что наибольшее снижение интегральных потерь составило 7% в относительных величинах. Снижение потерь было достигнуто, как в ядре потока, так и в области вторичных течений.

Существенно влиять на структуру течения в турбинных решетках, а следовательно получать дополнительных выигрыш при постановке оптимизационной задачи позволяет меридиональное профилирование поверхностей межлопаточного канала. Оптимизация периферийного меридионального обвода с помощью разработанного метода позволила дополнительно снизить интегральные потери 1,4% в относительных величинах. Построение формы меридионального обвода осуществляется с использованием кривых Безье 4-го порядка для решеток без раскрытия и 3-го порядка – для решеток с раскрытием. Использование лопатки переменного по высоте профиля при постановке оптимизационной задачи также позволяет снизить интегральные потери.

Ключевые слова: направляющая решетка осевой турбины, меридиональный обвод, методика пространственной оптимизации, макро моделирование, интегральные потери, CFD расчеты.

Barannik V.S. The three-dimensional aerodynamic optimization of axial turbine nozzle cascade. Manuscript.

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

The thesis is devoted to development the methods of the three-dimensional aerodynamic optimization of axial turbine nozzle cascades by defining the optimal shape of profiles and nozzle channel meridional shape. The formulation of an optimi-

zation problem using this methods allows to consider the additional efficiency reserves.

While implementing developed method design of the turbine profiles using different kinds of curves was carried out. For each of the curve types the control parameters that allow to widely vary the profile geometry were determined. The results reliability was confirmed by providing verification of the nozzle and blade cascade simulations with experimental data.

Using developed methods the optimization of the third stage nozzle cascade with a constant height profile of the powerful steam turbine using different types of curves was conducted. As a result of optimization the largest reduction of the integral losses by 7% in relative values was shown. Further optimization of the shroud meridional shape using developed optimization method increased this value by 1.4%. Formulation optimization task Using variable nozzle height profile also reduces the integral loses.

Keywords: nozzle cascade of axial turbine, meridional shape, methods of three-dimensional optimization, macromodelling, integral losses, *CFD* simulations.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'A. P.' followed by a long, sweeping flourish.