

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

ТЕМЧЕНКО СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.165

**ОБЕРНЕНА АЕРОДИНАМІЧНА ЗАДАЧА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО
ПРОЕКТУВАННЯ КІЛЬЦЕВИХ ДИФУЗОРНИХ КАНАЛІВ
ТУРБОМАШИН**

Спеціальність 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2015

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник – доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Суботович Валерій Петрович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут»,
професор кафедри турбінобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Герасименко Володимир Петрович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний
інститут»,
професор кафедри теорії авіаційних двигунів

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Аннопольська Ірина Євгеніївна,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
старший науковий співробітник відділу загальнотехні-
чних досліджень в енергетиці

Захист відбудеться « 29 » жовтня 2015 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий « 26 » вересня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. ККД парових та газових турбін багато в чому визначається газодинамічною ефективністю їх проточних частин, важливими елементами яких є кільцеві перехідні і вихідні дифузорні канали. Для газових турбін на теперішній час однією із суттєвих є проблема пошуку шляхів усунення підвищених аеродинамічних втрат в дифузорних пристроях, до яких висуваються суворі вимоги щодо ваги, габаритних розмірів, вібраційних та шумових характеристик. У сучасних транспортних газотурбінних двигунах для зменшення їх габаритних розмірів доводиться йти на значне підвищення швидкості виходу потоку за останнім ступенем турбіни, що тягне за собою збільшення втрат з вихідною швидкістю та різке зниження ККД всього ГТД. Втрати можуть бути істотно знижені, якщо використовувати дифузорний вихідний патрубок з високим коефіцієнтом відновлення тиску. А значне зменшення осьового розміру вихідного патрубку за умови збереження його аеродинамічної ефективності дозволить створювати конструкції транспортних газотурбінних двигунів з необхідними габаритними розмірами і високим ККД.

Проблему раціонального конструювання елементів проточних частин турбомашин на сьогоднішній день можна вирішити тільки за допомогою використання більш досконалих методів розрахунку течії в задачах оптимального проектування. Перспективним напрямом є використання оберненої задачі, яка дозволить створювати кільцеві дифузорні канали з високою аеродинамічною якістю при значному скороченні часу, що витрачається на проектування та доведення. У зв'язку з цим розробка перспективного методу розрахунку течії для кільцевих дифузорних каналів, який дозволив би не тільки визначати параметри потоку в каналах з відомою формою (пряма аеродинамічна задача), та й знаходити геометричні характеристики каналів за заданими аеродинамічними умовами течії і габаритними розмірами (обернена аеродинамічна задача) за час, прийнятний для вирішення інженерних задач проектування, є актуальною науково-практичною задачею, яка визначила напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі турбінобудування НТУ «ХП» у межах НДР МОН України: «Розрахункові дослідження аеродинамічної досконалості профілів соплових і робочих лопаток парових турбін ТЕС і АЕС» (ДР № 0109U002388, 2009-2010 рр.), «Розрахункові дослідження аеродинамічної досконалості елементів проточних частин парових і газових турбін» (ДР № 0111U002267, 2011-2012 рр.) та «Розрахункові та експериментальні дослідження з метою створення дифузорного пристрою для натурних випробувань кільцевих решіток турбін на надзвукових режимах» (ДР № 0113U000430, 2013-2014 рр.), в яких здобувач брав безпосередню участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи – для розрахунку вісесиметричної течії в дифузорних кільцевих каналах турбомашин розробити метод розв'язання прямої та оберненої аеродинамічних задач, який враховує особливості організації обчислювального процесу оптимального проектування

перехідних і вихідних дифузорів. Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- на єдиній методологічній основі розробити чисельний метод розв'язання прямої та оберненої аеродинамічних задач для кільцевих каналів;
- визначити особливості течії у перерізах кільцевих міжвінцевих осьових зазорів проточної частини турбомашини при заданому розподілу вздовж перерізу каналу кута закрутки потоку на основі розрахункового методу;
- провести порівняння результатів розрахунків течії у перерізах кільцевих міжвінцевих осьових зазорів з результатами лабораторних досліджень експериментальної повітряної турбіни;
- визначити параметри потоку в кільцевих дифузорах та порівняти результати розрахунку з даними експериментальних досліджень;
- розв'язати задачу оптимального проектування кільцевого дифузора з урахуванням обмежень на ступінь розширення та габаритні розміри;
- провести верифікацію CFD-програми щодо розрахунків кільцевих дифузорів на основі загальноновизнаних експериментальних даних для дифузорних каналів;
- виконати за допомогою CFD-програми дослідження характеристик розробленого на основі методу розв'язання оберненої аеродинамічної задачі оптимального кільцевого дифузора у широкому діапазоні режимів роботи.

Об'єкт дослідження – аеродинамічні процеси в проточній частині турбомашини.

Предмет дослідження – газодинамічні характеристики кільцевих дифузорних каналів.

Методи дослідження. Розрахунково-теоретичні методи дослідження течії потоку в кільцевих дифузорах турбомашин базуються на фундаментальних основах газодинаміки та чисельних математичних методах. Зокрема, рух робочого тіла описується рівняннями збереження енергії, процесу, нерозривності і збереження кількості руху; звичайні диференціальні рівняння вирішуються методом Рунге-Кутта четвертого порядку; для розв'язання задач пошуку мінімумів функцій використані методи нелінійного програмування та методи розв'язання задач нелінійної невідпуклої оптимізації.

Наукова новизна одержаних результатів визначається комплексним підходом до вирішення проблем, пов'язаних з аеродинамічним вдосконаленням кільцевих дифузорів турбомашин на основі оберненої аеродинамічної задачі:

- вперше запропоновано чисельний метод, який дозволяє розв'язувати пряму та обернену аеродинамічні задачі для вісесиметричної течії в кільцевих каналах з єдиної методологічної позиції при однаковій точності результатів;
- вперше пряму та обернену аеродинамічні задачі для кільцевих дифузорних каналів розділено на задане число окремих підзадач, незалежних одна від одної, які можна розв'язувати в будь-якій послідовності або одночасно, що забезпечує можливість контролю форми будь-якої ділянки каналу, який проектується, і дозволяє значно скоротити час проектування, а окремі підзадачі розв'язуються методами нелінійного програмування, які не вимагають зберігання істотних обсягів інформації;

– вперше на основі оберненої аеродинамічної задачі розроблено методику оптимального проектування безвідривних кільцевих дифузورних каналів із заданими ступенем розширення, радіальним і осьовим габаритами.

Практичне значення одержаних результатів для галузі турбінобудування полягає у наступному:

1. Розроблено метод розв'язання прямої та оберненої аеродинамічних задач для кільцевих дифузорних каналів проточних частин турбомашин, який став основою оптимального проектування дифузорів;

2. Розроблено комплекс комп'ютерних програм для розрахунку вісесиметричної течії в межах прямої та оберненої аеродинамічних задач і розв'язання задачі оптимального проектування кільцевого дифузора за критерієм мінімуму втрат кінетичної енергії;

3. Виконано оптимальне проектування кільцевого дифузорного каналу зі ступенем розширення і геометричними параметрами, характерними для вихідних дифузорів компресорів і газових турбін, в результаті чого забезпечені як низький рівень коефіцієнта повних втрат та безвідривний характер течії, так і зменшення на 20% осьового габариту в порівнянні з передотривним дифузором, що має прямолінійні обводи.

Результати досліджень використовуються на підприємстві ПАТ «ТУР-БОАТОМ», (м. Харків, акт від 23.04.2015 р) і в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ «ХП» (акт від 24.04.2015 р).

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка методу розв'язання прямої аеродинамічної задачі для осьових кільцевих каналів, які складаються з послідовно розміщених ділянок двох типів: вільних ділянок і ділянок, зайнятими деякими пристроями, які здатні змінювати кути закручування потоку; розробка методу і комплексу комп'ютерних програм для розв'язання прямої та оберненої аеродинамічних задач для кільцевого каналу; розрахункове дослідження кільцевого дифузора та порівняння його результатів з експериментальними даними; на основі оберненої аеродинамічної задачі розроблена методика оптимального проектування та виконано оптимальне проектування кільцевого дифузорного каналу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2008, 2010, 2011); Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2012, 2014, 2015); Міжнародній науковій конференції «Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації» (м. Київ, 2012); XVIII – XX, XXII та XXIII Міжнародних науково-практичних конференцій «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2010 – 2012, 2014, 2015 рр.); XV Міжнародній науково-технічній конференції асоціації спеціалістів промислової гідравліки і пневматики «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Мелітополь, 2014).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображені в 14 наукових публікаціях, з них: 7 – у наукових фахових виданнях України (5 статей індексуються наукометричною базою Google Академія та мають h-індекс 3, 2 – у виданнях, що входять до наукометричної бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)), 7 – у матеріалах конференцій (1 входить до наукометричної бази Google Академія).

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації і 2 додатків. Повний обсяг дисертації складає 147 сторінок, серед них 36 рисунків за текстом і 2 рисунка на 2 окремих сторінках, 2 таблиці за текстом, списку використаних джерел інформації з 138 найменувань на 17 сторінках, 2 додатків на 2 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, дано загальну характеристику дисертації.

У першому розділі зроблено аналіз існуючих методів розрахунку течії та методів оптимального проектування елементів проточної частини турбомашин. Обґрунтовано, що розробка перспективних методів розв'язання як прямої, так і оберненої аеродинамічних задач для кільцевих каналів, які враховують особливості організації обчислювального процесу задач оптимального проектування турбомашин, є актуальною задачею.

У другому розділі для кільцевих каналів запропоновані постановка і метод розв'язання прямої аеродинамічної задачі при заданому розподілі вздовж перерізу каналу кута закрутки потоку, виконані розрахунки течії у перерізах міжвінцевих зазорів проточної частини осьової турбомашини та проведені порівняння результатів розрахунків течії у перерізах зазорів з результатами лабораторних досліджень експериментальної повітряної турбіни.

Пряма задача дозволяє визначати початкові дані для проектування вихідного або перехідного дифузора турбомашини, а саме: розподіли параметрів робочого тіла за останнім ступенем або випрямляючим апаратом перед дифузором. Розглядається проточна частина осьової турбомашини, що складається з двох типів ділянок: ділянок, які зайняті кільцевими решітками лопаток, та вільних ділянок – осьових зазорів між решітками.

Течія вважається такою, що має осьову вісь симетрії. Граничні умови задані геометричними – це дві аналітичні функції $R_H(z)$ та $R_T(z)$, що описують зміни радіусів кореневого та периферійного меридіональних окреслень каналу у осьовому напрямку z . Розрахунок потоку виконується в торцевому перерізі зазору $z = const$. Задано: 1) величини координат кореневого $R_H(z)$ та периферійного $R_T(z)$ обводів зазору та їх перших та других похідних dR_H/dz , dR_T/dz , d^2R_H/dz^2 , d^2R_T/dz^2 ; 2) масова витрата крізь переріз зазору m ; 3) функції роз-

поділяння повного тиску $p^*(r)$ та повного питомого об'єму $v^*(r)$; 4) функція розподілу кута закрутки потоку $\alpha(r)$. Необхідно визначити на заданих радіусах перерізу компоненти швидкості потоку C_z, C_r, C_u , тиск p та питомий об'єм v .

Вважається, що робоче тіло стискається та є нев'язким, течія – стала, адіабатична і безвідривна, а повна ентальпія, ентропія і коефіцієнт ізоентропи залишаються постійними уздовж лінії течії. Система координат – нерухома циліндрова, де φ – окружний напрям, r – радіальний напрям. Для опису руху та перетворення енергії використано наступну систему рівнянь:

1) рівняння збереження енергії уздовж лінії течії

$$\frac{k}{k-1} p^* v^* = \frac{k}{k-1} p v + \frac{C^2}{2}; \quad (1)$$

2) рівняння ізоентропійного процесу уздовж лінії течії

$$p v^k = const \quad \text{або} \quad \frac{dv}{dz} = -\frac{v^2}{a^2} \frac{dp}{dz}, \quad (2)$$

де $a = \sqrt{k p v}$ – швидкість звуку;

3) рівняння нерозривності

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{C_r r}{v} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{C_z r}{v} \right) = 0; \quad (3)$$

4) три проекції рівняння кількості руху на координатні осі

$$C_r \frac{\partial C_r}{\partial r} + C_z \frac{\partial C_r}{\partial z} - \frac{C_u^2}{r} = -v \frac{\partial p}{\partial r}; \quad (4)$$

$$C_r \frac{\partial C_u}{\partial r} + C_z \frac{\partial C_u}{\partial z} + \frac{C_u C_r}{r} = 0 \quad \text{або} \quad C_u r = const \quad \text{вздовж лінії течії}; \quad (5)$$

$$C_r \frac{\partial C_z}{\partial r} + C_z \frac{\partial C_z}{\partial z} = -v \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (6)$$

Аеродинамічні задачі розв'язуються на меридіональній площині.

Введено функцію масової витрати $G(z, r) = m \Psi(z, r)$, де $\Psi(z, r) \in [0, 1]$ – безрозмірна функція течії, m – масова витрата робочого тіла крізь канал. Рівняння нерозривності (3) замінено еквівалентною системою рівнянь:

$$C_z = \frac{v}{2\pi r} \frac{\partial G}{\partial r}; \quad C_r = -\frac{v}{2\pi r} \frac{\partial G}{\partial z}; \quad \text{tg} \gamma = -\frac{\partial G}{\partial z} / \frac{\partial G}{\partial r}. \quad (7)$$

Вид безрозмірної функції течії $\Psi(z, r)$ вибрано виходячи з того, що вона визначає розподіл частки масової витрати у каналі уздовж довільної кривої, яка сполучує будь-яку точку на кореновому меридіональному окресленні каналу $R_H(z)$ з будь-якою точкою на периферійному окресленні $R_T(z)$

$$\Psi(z, r) = \frac{\bar{F}(z, r) + x(z, r) \bar{F}(z, r)}{1 + x(z, r) \bar{F}(z, r)}. \quad (8)$$

Для перерізу каналу $z = const$ абсолютна площа перерізу змінюється від границі каналу $R_H(z)$ до границі каналу $R_T(z)$ так $F(r, z) = \pi (r^2 - R_H^2)$. Відносна пло-

ща перерізу шару при цьому дорівнює $\bar{F}(z, r) = (r^2 - R_H^2) / (R_T^2 - R_H^2)$, $0 \leq \bar{F}(\theta, z) \leq 1$. Функція $\Psi(z, r)$ – безперервна функція, що двічі диференціюється та змінюється у інтервалі $[0, 1]$. Якщо задати конкретний переріз шару $z = z_i$, а функція $x(r, z)$ має вигляд $x(z, r) = f(r, a_0(z), a_1(z), \dots, a_l(z))$, $-1 < x(z, r) < \infty$, тоді в кожній точці r_j цього перерізу величини $a_0(z_i), a_1(z_i), \dots, a_l(z_i)$, $\frac{\partial a_0(z_i)}{\partial z}, \frac{\partial a_1(z_i)}{\partial z}, \dots, \frac{\partial a_l(z_i)}{\partial z}$, та $\frac{\partial^2 a_0(z_i)}{\partial z^2}, \frac{\partial^2 a_1(z_i)}{\partial z^2}, \dots, \frac{\partial^2 a_l(z_i)}{\partial z^2}$ – дійсні числа, а функція $\Psi(z_i, r)$ – функція $3(l+1)$ дійсних змінних. Наприклад, коли $l = 0$, тоді незалежних змінних у функції $\Psi(z_i, r)$ три, а саме: $a_0(z_i), \frac{\partial a_0(z_i)}{\partial z}$ та $\frac{\partial^2 a_0(z_i)}{\partial z^2}$.

Проекції рівняння кількості руху на радіальний і осевий напрями зведені до одного рівняння

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1 - M_{C_z}^2}{1 - M_{C_z}^2 - M_{C_r}^2} \left\{ \frac{M_{C_z} M_{C_r}}{1 - M_{C_z}^2} v B_1 - B_2 + \frac{C_u^2}{vr} \right\}, \quad (9)$$

де $M_{C_z}, M_{C_r}, M_{C_u}$ – числа Маха для компонентів швидкості потоку,

$$B_1 = \frac{v}{(2\pi r)^2} \frac{\partial G}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{r} \frac{\partial G}{\partial z} - \frac{\partial^2 G}{\partial z \partial r} \right) \operatorname{tg} \gamma - \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} \right],$$

$$B_2 = \frac{1}{(2\pi r)^2} \frac{\partial G}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{r} \frac{\partial G}{\partial r} - \frac{\partial^2 G}{\partial r^2} \right) \operatorname{tg} \gamma - \frac{\partial^2 G}{\partial r \partial z} \right].$$

Для перерізу кільцевого каналу $z = \text{const}$ система рівнянь (1) – (6) з урахуванням замикаючого співвідношення $\alpha(r)$ зведена до еквівалентної системи двох рівнянь (1) та (9) відносно невідомих функції масової витрати та тиску.

В осьовому зазорі вибираються на лінії перетину площини $z = \text{const}$ з меридіональною площиною $\varphi = \text{const}$ (далі – у розрахунковому перерізі $z = z_i$) рівновіддалені точки r_j , $j = \overline{1, N}$, $r_1 = R_H(z)$, $r_N = R_T(z)$. Вважається, що величини дійсних змінних безрозмірної функції течії (8) заданими, наприклад нулями, що відповідає закрутці потоку за законом $C_z / v = \text{const}$. Далі знайдуться величини функції течії (8) та всіх її часткових похідних до другого порядку включно у вибраних точках r_j , $j = \overline{1, N}$. Для перерізу $z = z_i$ рівняння (9) – звичайне диференціальне рівняння виду $\frac{dp}{dr} = f(r, p)$. А гранична умова задачі Коші, наприклад тиск p_1 , знайдеться в точці r_1 за допомогою рівняння збереження енергії (1):

$$\frac{2k}{k-1} \left[p_1^* v_1^* - p_1 v_1^* \left(\frac{p_1^*}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} \right] = \left[\frac{m}{2\pi r_1} v_1^* \left(\frac{p_1^*}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} \right]^2 \left[\left(\frac{\partial \Psi}{\partial r} \right)_1^2 (ctg^2 \alpha_1 + 1) + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} \right)_1^2 \right]. \quad (10)$$

За допомогою рівняння (1) для будь-якої точки r_j , $j = \overline{1, N}$ знаходиться тиск, який забезпечує масову витрату m крізь переріз $z = z_i$ при умові розв'язання задачі мінімізації функції однієї змінної $g(p_j)$

$$g(p_j) = \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[p_j^* v_j^* - p_j v_j^* \left(\frac{p_j^*}{p_j} \right)^{\frac{1}{k}} \right] - \left[\frac{m}{2\pi r_j} v_j^* \left(\frac{p_j^*}{p_j} \right)^{\frac{1}{k}} \right]^2 \left[\left(\frac{\partial \Psi}{\partial r} \right)_j^2 (ctg^2 \alpha_j + 1) + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} \right)_j^2 \right] \right\}^2 \rightarrow \min. \quad (11)$$

Величини $p^*(z_i, r_j)$ і $v^*(z_i, r_j)$, $j = \overline{1, N}$ визначаються так: для точок r_j з номерами $j = \overline{2, N}$ розв'язується рівняння $G(z_{i-1}, r) = G(z_i, r_j)$ та знайдеться, на якому радіусі поверхня течії, до якої належить точка r_j перерізу $z = z_i$, перетинає переріз $z = z_{i-1}$ попереднього осьового зазору, розрахунок в якому вже виконаний, а далі для всіх точок r_j , $j = \overline{1, N}$ визначаються величини $p^*(z_i, r_j)$ і $v^*(z_i, r_j)$ з урахуванням коефіцієнта втрат решітки лопаток, що розташована між перерізами $z = z_i$ та $z = z_{i-1}$ сусідніх осьових зазорів.

Задачу розв'язання системи двох рівнянь (1) і (9) замінено еквівалентною задачею нелінійного програмування, незалежними змінними якої виступають дійсні змінні функції течії (8). Побудова функції цілі базується на оцінці кількісних розбіжностей у визначені величини абсолютної швидкості потоку C в точках r_j , $j = \overline{2, N}$, а саме: для відомого тиску, розв'язка задачі Коші, швидкість

$$\text{можна визначити з рівняння (1) за формулою } \frac{2k}{k-1} (p^* v^* - p v) = C^2 \text{ або за допомогою величин перших часткових похідних функції течії}$$

$$C_z^2 + C_u^2 + C_r^2 = \left(m \frac{v}{2\pi r} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial \Psi}{\partial r} \right)^2 (ctg^2 \alpha + 1) + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} \right)^2 \right] = C^2.$$

Задача Коші на основі рівняння (9) з граничною умовою p_1 в точці $r_1 = R_H(Z_i)$ розв'язується методом Рунге-Кутта та визначається в точках r_j , $j = \overline{1, N}$ компоненти вектора швидкості потоку та інші параметри течії. Проте, виконання рівняння збереження енергії гарантоване тільки в одній точці r_1 . Тому в точках r_j , $j = \overline{2, N}$ визначаються масові витрати, які очікуються відповідно до знайденого розв'язка задачі Коші

$$m_{w_j} = \sqrt{\frac{\frac{2k}{k-1}(p_j^* v_j^* - p_j v_j)}{\left(\frac{v_j}{2\pi r_j}\right)^2 \left[\left(\frac{\partial \Psi}{\partial r}\right)_j^2 (\text{ctg}^2 \alpha_j + 1) + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z}\right)_j^2 \right]}} \quad (12)$$

та порівнюються з відомою величиною масової витрати m крізь переріз $z = z_i$.

Таким чином, задача трактується як знаходження таких величин дійсних змінних безрозмірної функції течії (8), щоб величини тиску p_j , $j = \overline{1, N}$, які одержані в результаті розв'язання задачі Коші, перетворити рівняння збереження енергії (1) в тотожність в усіх точках r_j , $j = \overline{1, N}$ перерізу $z = z_i$.

У такій постановці задача розв'язувалась методом Нелдера і Міда. Алгоритм обчислення цільової функції: 1) визначається функція (8) і всі її похідні до другого порядку включно в точках r_j , $j = \overline{1, N}$; 2) якщо є необхідність, то знаходяться параметри робочого тіла v_j^* і p_j^* , $j = \overline{1, N}$ за результатами розв'язку задачі в перерізі $z = z_{i-1}$; 3) розв'язуються послідовно задача одновимірної оптимізації (11) для точки з номером $j = 1$ і задача Коші, визначається тиск $p_j^{(1)}$ в точках $j = 2, 3, \dots, N$; 4) за допомогою рівняння (12) відповідно до тиску $p_j^{(1)}$ обчислюються очікувані масові витрати $m_{w_j}^{(1)}$; 5) виконуються крок 3 і 4 для точки з номером $j = N$ та для точок з номерами $j = N - 1, N - 2, \dots, 1$ та визначаються тиск $p_j^{(2)}$ та очікувані масові витрати $m_{w_j}^{(2)}$; 6) обчислюється цільова функція, побудована за принципом критерію методу найменших квадратів

$$S(X) = \frac{1}{2(N-1)} \left(\sum_{j=2}^N \left(\frac{m_{w_j}^{(1)} - m}{m} \right)^2 + \sum_{j=1}^{N-1} \left(\frac{m_{w_j}^{(2)} - m}{m} \right)^2 \right). \quad (13)$$

Числові розв'язування прямої задачі для двох перерізів зазорів ступеня повітряної осьової турбіни порівняні з експериментальними даними випробувань, виконаних в аеродинамічній лабораторії кафедри турбінобудування НТУ «ХП» (рис. 1). На всіх радіусах перерізів визначалися величини компонентів вектора абсолютної швидкості потоку C_z , C_u , C_r , тиск p та питомий об'єм v робочого тіла (компоненти швидкості потоку C_z , C_u віднесено до величини швидкості, що еквівалентна тепловому перепаду на ступінь).

Порівняння результатів розрахункового дослідження ступеня турбіни з даними фізичного експерименту підтверджують, що метод розв'язання аеродинамічних задач дозволяє з прийнятною точністю визначати розподіли параметрів потоку вздовж радіусів за решітками лопаток турбомашини.

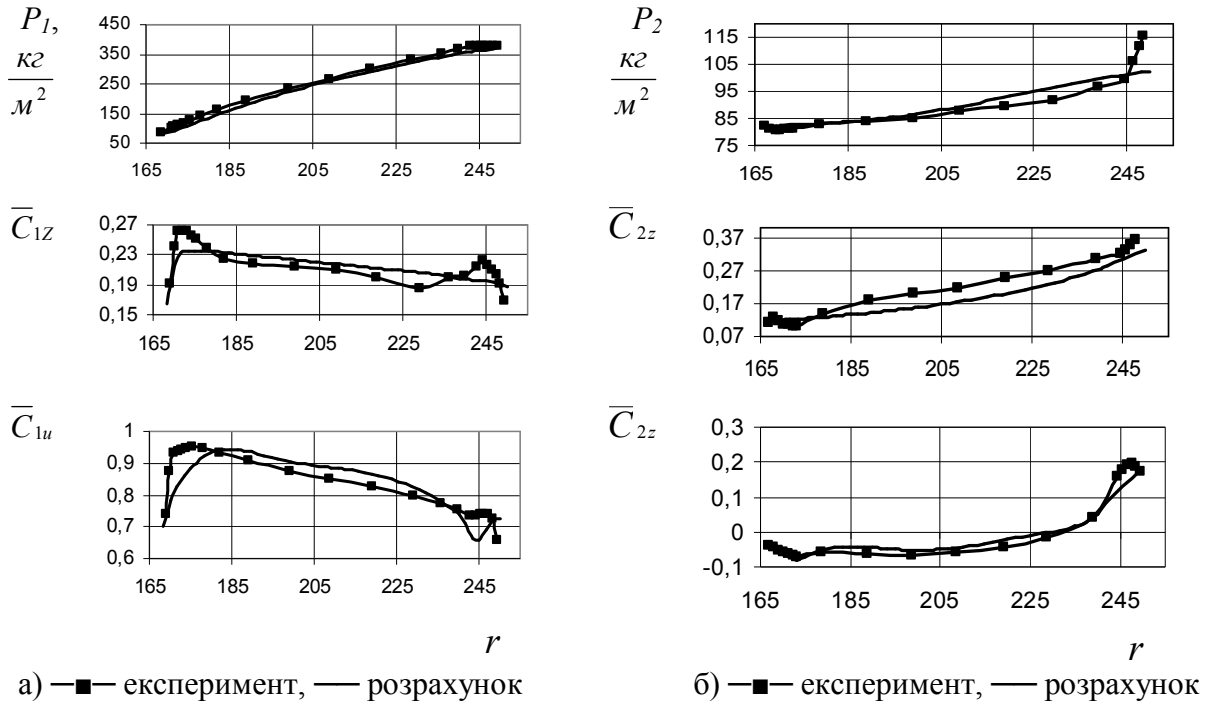


Рисунок 1 – Розподіл параметрів потоку

а) переріз 1 за сопловим апаратом б) переріз 2 за робочим колесом

У третьому розділі запропоновані постановки та шляхи розв'язування прямої аеродинамічної задачі для кільцевих осьових або осерадіальних каналів, оберненої аеродинамічної задачі для кільцевих осьових каналів та наведено порівняння результатів розрахунків течії у кільцевому осьовому дифузори з результатами його лабораторних експериментальних досліджень.

Для прямої аеродинамічної задачі течія вважається такою, що має осьову вісь симетрії. Рух та перетворення енергії у осьовому або осерадіальному каналах описується системою рівнянь (1)-(6), яка зводиться до системи до трьох рівнянь (1), (9), (6), де серед рівнянь (6) вибрано рівняння $C_u r = const$. Виконується перехід від координатних напрямів r та z до ортогональних напрямів m та n , повернутих на кут α , $0 \leq \alpha \leq 90^0$, який відлічується від координатного напрямку z (рис. 2), що базується на зв'язку між напрямками: $r = n \cdot \sin \alpha + m \cdot \cos \alpha$, $z = n \cdot \cos \alpha - m \cdot \sin \alpha$. Якщо змінювати кут повороту α і положення нульової точки напрямів m та n , то отримується на меридіональній площині будь-яка необхідна кількість прямих $n = const$. Пряма аеродинамічна задача розглядається як множина окремих прямих задач для вибраних перерізів $n = n_i$, $i = \overline{1, L}$, які з достатньою густиною вкривають весь канал. Граничні умови прямої задачі задані геометричними – це дві аналітичні функції $m_H = m_H(n_i)$ і $m_T = m_T(n_i)$, що описують зміни координат кореневого та периферійного меридіональних окреслень каналу.

Для окремої задачі задано: 1) величини координат $m_H = m_H(n_i)$ і $m_T = m_T(n_i)$ та їх похідних dm_H / dn , dm_T / dn , $d^2 m_H / dn^2$, $d^2 m_T / dn^2$; 2) масова витрата крізь переріз; 3) функції розподілу повних тиску $p^*(m)$ та питомого

об'єму $v^*(m)$; 4) функція розподілу компоненти швидкості $C_u(m)$. Необхідно визначити в заданих точках перерізу компоненти швидкості потоку C_z, C_r, C_u , тиск p та питомий об'єм v . Окремі задачі у перерізах $n = n_i, i = \overline{1, L}$, як і задача у розрахунковому перерізі $z = z_i$ на вході у канал, – задача нелінійного програмування.

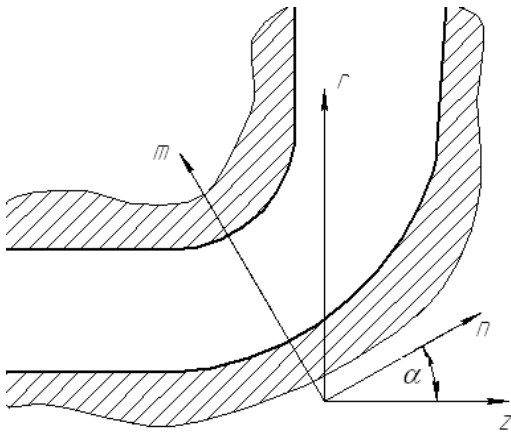


Рисунок 2 – Координатні напрями на меридіональній площині

У обернених задачах всі граничні умови задані аеродинамічними – це параметри течії в ядрі потоку, а саме: дві функції $R(z)$ та $C(z)$, що описують зміни радіальної координати однієї з ліній течії та швидкості потоку вздовж цієї лінії течії.

Течія вважається такою, що має осьову вісь симетрії. Рух та перетворення енергії у осьовому каналі описується системою рівнянь (1)-(6), яка зводиться до системи трьох рівнянь (1), (9), (6), де серед рівнянь (6) вибирається друге рівняння $C_u r = const$.

Обернена задача – це множина окремих обернених задач для вибраних перерізів

$z = z_i, i = \overline{1, L}$, які з достатньою густиною вкривають весь канал.

Для окремої задачі задається:

1) масова витрата робочого тіла m ;

2) функції $p^*(r), v^*(r)$ та $C_u(r)$ у перерізі перед каналом $z = z_0$;

3) граничні умови оберненої задачі: величини радіальної координати $R = R(z_i)$ однієї з ліній течії (у разі вибору лінії течії $\Psi(z, r) = 0$ або $\Psi(z, r) = 1$ задача переходить до класу гібридних задач), та її похідних $dR/dz, d^2R/dz^2, d^3R/dz^3$; величини швидкості потоку вздовж вибраної лінії течії $C = C(z_i)$ та її похідних $dC/dz, d^2C/dz^2$.

Необхідно визначити координати меридіональних окреслень $R_H = R_H(z_i), R_T = R_T(z_i)$ та компоненти швидкості потоку C_z, C_r, C_u , та параметри робочого тіла p та v у середині каналу.

Окрема задача розділяється на дві підзадачі (рис. 3):

1) для частки масової витрати m_1 знаходиться точка $R_T = R_T(z_i)$ і визначаються в будь-якій точці перерізу $z = z_i$ між точками $R = R(z_i)$ і $R_T = R_T(z_i)$ параметри робочого тіла; 2) для частки масової витрати $m_2 = m - m_1$ знаходиться точка $R_H = R_H(z_i)$ і визначаються між точками $R = R(z_i)$ і $R_H = R_H(z_i)$ параметри робочого тіла. Перша і друга підзадачі, як і задача у розрахунковому перерізі $z = z_i$ на вході у канал, – задачі нелінійного програмування. Алгоритми обчислювання цільової функції у першій та другій підзадачі збігаються з точністю до індексів.

Алгоритм обчислення цільової функції першої підзадачі:

1) в точці $r_1 = R(z_i)$ знаходяться похідні функції течії ($\Psi(z_i, r_1)=0$), параметри v_1^* , p_1^* , швидкість $C_1 = C(z_i)$, гранична умова задачі Коші

$$p_1 = \left[\frac{k-1}{k v_1^*} (p_1^*)^{\frac{1}{k}} \right]^{k-1} \left(\frac{k}{k-1} p_1^* v_1^* - \frac{C_1^2}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

складові швидкості потоку C_{z1} , C_{u1} , C_{r1} та їх похідні;

2) розв'язується система рівнянь відносно невідомих величин $R_T = R_T(z_i)$, dR_T/dz , $d^2 R_T/dz^2$, яка визначається граничними умовами окремої задачі:

$$\begin{cases} C_1^2 - C_{z1}^2 - C_{u1}^2 - C_{r1}^2 = 0, \\ C_1 \frac{dC}{dz} - C_{z1} \frac{dC_{z1}}{dz} - C_{u1} \frac{dC_{u1}}{dz} - C_{r1} \frac{dC_{r1}}{dz} = 0, \\ \left(\frac{dC_1}{dz} \right)^2 + C_1 \frac{d^2 C}{dz^2} - \left(\frac{dC_{z1}}{dz} \right)^2 - C_{z1} \frac{d^2 C_{z1}}{dz^2} - \\ - \left(\frac{dC_{u1}}{dz} \right)^2 - C_{u1} \frac{d^2 C_{u1}}{dz^2} - \left(\frac{dC_{r1}}{dz} \right)^2 - C_{r1} \frac{d^2 C_{r1}}{dz^2} = 0; \end{cases}$$

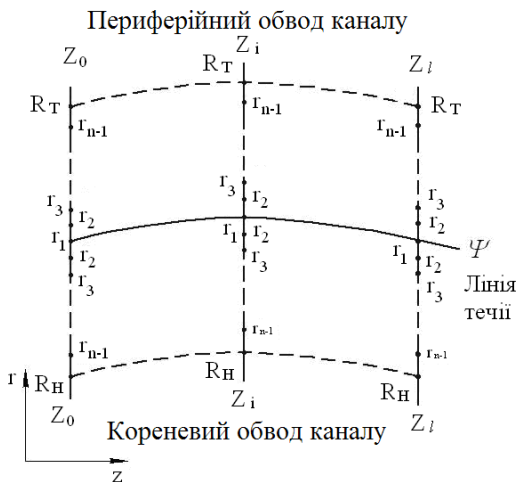


Рисунок 3 – До постановки оберненої задачі

3) задаються рівновіддалені точки r_j , $j = \overline{1, N}$, $r_1 = R_H(z_i)$, $r_N = R_T(z_i)$, розв'язується задача Коші і визначається тиск p_j в точках $j = 2, 3, \dots, N$;

4) за допомогою рівняння (12) відповідно до тиску p_j обчислюються очікувані масові витрати m_{Wj} ;

5) обчислюється цільова функція

$$S(X) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=2}^N \left(\frac{m_{Wj} - m_1}{m_1} \right)^2.$$

Отже, обернена задача розділена на дві, незалежні одна від одної, підзадачі, а кожна підзадача складається із заданої кількості окремих задач у перерізах $z = const$. Окремі задачі розв'язуються в будь-якій послідовності, незалежно від приналежності до першої або другої підзадачі, або одночасно.

Для кінцевого дифузора компресора, що мав довжину 1000 мм та ступінь розширення 2 проводилося порівняння результатів розрахунків в межах прямої задачі з даними його лабораторних випробувань.

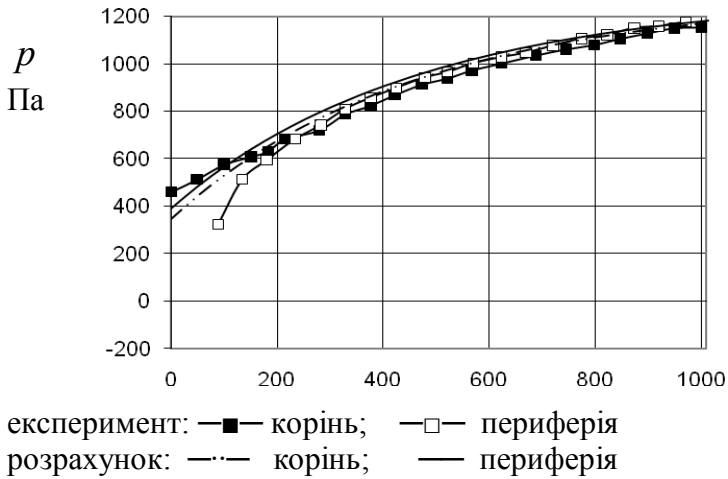


Рисунок 4 – Розподіл статичного тиску вздовж обводів дифузора

проектування осевого кільцевого дифузора за умов обмежень на ступінь розширення та на радіальні і осеві габаритні розміри.

Безвідривна течія в дифузорах можлива тільки при певних поєднаннях кута розкриття α і ступеня розширення n . Зв'язок між граничними значеннями цих параметрів ілюструє крива Кляйна (рис. 5), яка ділить площину ($\alpha - n$) на дві частини: знизу – безвідривна течія, зверху – течія з відривом потоку.

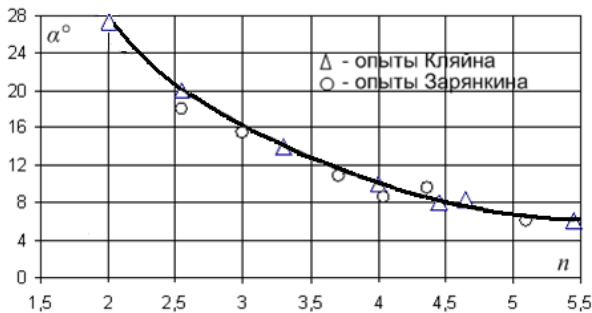


Рисунок 5 – Крива Кляйна

визначається за методикою А.Ш. Дорфмана. Втрати оцінюються на основі зміни величини локального еквівалентного кута розширення $\theta = 2 \arctg(1/U \times dF/dL)$, де U – величина змоченого периметра перерізу, нормального до середньої лінії каналу, а F – площа перерізу; L – довжина середньої лінії каналу. Незалежні змінні задачі оптимізації – коефіцієнти двох поліномів, що описують геометрію середньої лінії течії та розподіл швидкості потоку уздовж неї. Задача оптимізації розв'язувалася за допомогою методу ψ -перетворень В.К. Чічінадзе.

Дифузор-прототип мав прямолінійні обводи, $n=2$, осевий габарит $l=0,5$ м, $\alpha=35,7^\circ$, а в той же час для дифузора з $n=2$ на кривій Кляйна $l=0,65$ м та $\alpha = 27,5^\circ$.

Форму каналу оптимального дифузора наведено на рис. 6.

Пряма задача розв'язувалася за умови використання у розрахункових перерізах $z = const$ як початкових даних величин повного тиску та повного питомого об'єму, визначених експериментальним шляхом (рис. 4).

У четвертому розділі викладено методику оптимального проектування дифузорних каналів на основі розв'язування оберненої аеродинамічної задачі та виконано оптимальне

В процесі оптимального проектування дифузору були задані габарити та ступінь розширення каналу; масова витрата робочого тіла та параметри робочого тіла в перерізі перед каналом; шість або менше умов для геометрії середньої лінії течії та шість або менше умов для швидкості потоку. Цільова функція задачі оптимізації – нелінійна полімодальна функція – коефіцієнт повних втрат дифузора, що

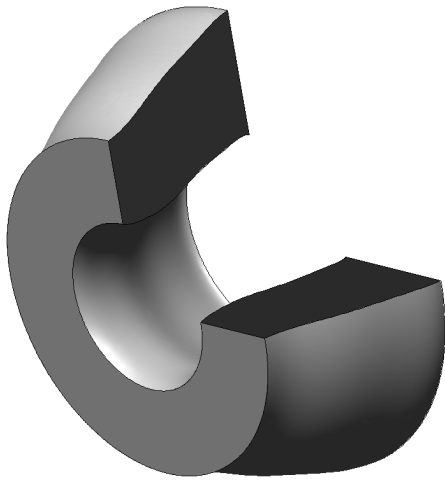


Рисунок 6 – Оптимальний дифузор

На рис. 7 показана розрахункова зміна величини локального еквівалентного кута розширення θ вздовж безрозмірної довжини каналу \bar{l} для трьох дифузорів з прямолінійними обводами і ступенем розширення $n=2$ та оптимального дифузора. У оптимального дифузора цей кут тричі зменшується, що стабілізує примежовий шар, а потім тричі росте, доводячи примежовий шар до передвідривного стану в точках $\bar{l}=0,25$ ($n=1,25$), $\bar{l}=0,8$, ($n=1,75$) і $\bar{l}=1$ ($n=2$). Обмеження на величину кута θ для вихідного перерізу оптимального дифузора дозволило в процесі оптимізації забезпечити низький рівень коефіцієнта втрат з вихідною швидкістю та прискорити сам процес оптимального пошуку.

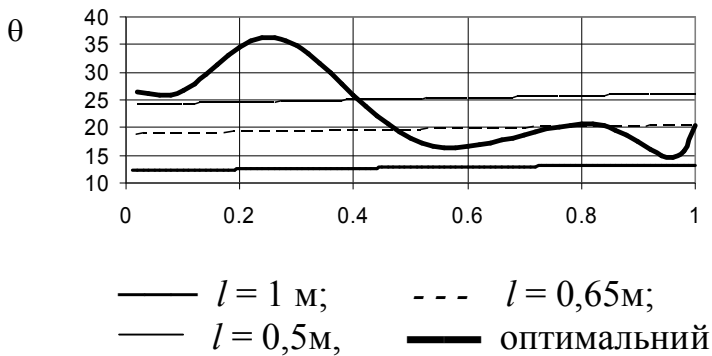


Рисунок 7 – Характер зміни кута θ

Поясненням такого характеру зміни кута θ може служити загальновідомий факт, що для отримання максимальної відновної здатності дифузора доцільно створити передвідривний стан примежового шару за умови можливо меншої товщини шару. Тобто, зразу ж за вхідним перерізом дифузор повинен мати за умови відсутності відриву максимально

можливе розкриття, а надалі повинен бути створений зменшений градієнт тиску, щоб потік залишався в передвідривному стані.

У п'ятому розділі наведені результати верифікації CFD-програми щодо розрахунків кільцевих дифузорів на основі загальновизнаних експериментальних даних для дифузорних каналів та виконано за допомогою CFD-програми дослідження характеристик розробленого оптимального кільцевого дифузора у широкому діапазоні режимів роботи.

При осьовому вході потоку в дифузори коефіцієнти повних втрат безвідривного ($l=1,0$ м), передвідривного ($l=0,65$ м) і оптимального ($l=0,5$ м) дифузорів практично однакові і менше на 5% абсолютних та на 16% відносних у порівнянні з дифузоре-прототипом ($l=0,5$ м), а при куті закрутки 40° коефіцієнт повних втрат оптимального дифузора в 1,4 рази менше, ніж у передвідривного дифузора і приблизно в 2 рази менше, ніж у дифузора-прототипу.

Величина коефіцієнта повних втрат оптимального дифузора майже не змінна у діапазоні чисел Маха $0,1 \dots 0,45$, який є характерним для вихідних дифузорів компресорів та енергетичних газових турбін.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі – розробці методу розв'язання прямої та оберненої аеродинамічних задач для оптимального проектування кільцевих перехідних і вихідних каналів проточних частин парових та газових турбін. Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. З єдиних методологічних позицій розроблено узагальнений метод розв'язання прямої та оберненої аеродинамічних задач для кільцевих дифузورних каналів, який дозволяє отримувати однакову точність розв'язків обох задач. Метод враховує особливості організації обчислювального процесу під час розв'язування задач оптимального проектування кільцевих дифузорних каналів, а саме: забезпечує можливість проведення паралельних обчислювальних процесів та не вимагає зберігання істотних обсягів інформації.

2. На основі методу розв'язання прямої та оберненої аеродинамічних задач для кільцевих дифузорних каналів та методу оптимізації полімодальних функцій (методу ψ -перетворень) розроблено методику оптимального проектування дифузорних каналів із заданим ступенем розширення та обмеженнями на радіальний, осьовий габарити та величину локального еквівалентного кута розширення каналу у вихідному перерізі.

3. Розроблено комплекс комп'ютерних програм для оптимального проектування кільцевих дифузорних каналів на основі методу розв'язування прямої та оберненої аеродинамічних задач, методу оптимізації полімодальних функцій багатьох змінних та методики визначення коефіцієнта внутрішніх втрат у каналах, яка створена на базі результатів експериментальних досліджень дифузорів.

4. Виконано порівняння результатів розрахунків течії у перерізах кільцевих міжвінцевих зазорів ступеня осьової турбіни та у вихідному дифузорі компресора з результатами лабораторних досліджень експериментальної повітряної турбіни та вихідного дифузора.

5. За результатами оптимального проектування визначено геометрію меридіональних обводів кільцевого дифузорного каналу малої довжини, який забезпечує безвідривний характер течії і низький рівень коефіцієнта повних втрат у порівнянні з традиційними кільцевими каналами таких же габаритних розмірів, для яких характерні відриви потоку.

6. Проведено верифікацію CFD-програми щодо розрахунків кільцевих дифузорів на основі загальновизнаних експериментальних даних та доведено достовірність результатів розрахунків характеристик дифузорів.

7. Розрахункові дослідження, що виконані за допомогою CFD-програми, підтвердили високу ефективність розробленого оптимального дифузора в широкому діапазоні чисел Маха та кутів закрутки потоку на вході в дифузор.

8. Результати досліджень впроваджено у ПАТ «Турбоатом», а також у навчальний процес кафедри турбінобудування НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Темченко С.А. Определение параметров осесимметричного потока в торцевом сечении кольцевого канала [Текст]/ В.П. Субботович, С.А. Темченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 6. – С. 52-55.

Здобувач розробив алгоритм методу розв'язання прямої аеродинамічної задачі для течії в торцевих перетинах кільцевих каналів.

2. Темченко С.А. Обратная задача для кольцевого канала [Текст]/ В.П.Субботович, С.А. Темченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 3. – С. 56-60.

Здобувач розробив алгоритм методу розв'язання оберненої задачі для закрученої вісесиметричної течії газу у осьовому кільцевому каналі.

3. Темченко С.А. О методе проектирования наружной границы выходного диффузора газовой турбины [Текст]/ В.П. Субботович, С.А. Темченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 67. – С. 155-161.

Здобувач розробив комп'ютерну програму, яка дозволяє знаходити координати периферійного обводу кільцевого диффузора.

4. Темченко С.А. Метод расчета течения в осерадиальных кольцевых каналах [Текст]/ В.П. Субботович, А.Ю. Юдин, С.А. Темченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 6. – С. 24-27.

Здобувач розробив алгоритм методу та комп'ютерну програму розв'язання прямої задачі для кільцевого осерадіального каналу.

5. Темченко С.А. Результаты тестирования метода расчета течения в кольцевых каналах [Текст]/ В.П. Субботович, Ю.А. Юдин, А.Ю. Юдин, С.А. Темченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 8. – С. 91-94.

Здобувачем виконано розрахунки кільцевого диффузора за допомогою перспективного методу розв'язання аеродинамічних задач та CFD-програми і проведено порівняння їх результатів з даними експерименту.

6. Темченко С.А. Расчет турбинной ступени по зазорам как решение обратных аэродинамических задач в свободных кольцевых каналах [Текст]/ В.П. Субботович, А.Ю. Юдин, С.А. Темченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 13. – С. 35-38.

Здобувачем виконано порівняння результатів випробувань ступеня осрової турбіни з одержаними розв'язками прямих аеродинамічних задач.

7. Темченко С.А. О влиянии на характеристики выходных диффузоров числа Маха за последней ступенью турбины [Текст] / Ю.А. Юдин, В.П. Субботович, А.Ю. Юдин, С.А. Темченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 15. – С. 101-105.

За допомогою CFD-програми здобувач виконав розрахункові дослідження двох дифузоров вихлопних патрубків потужних парових турбін.

8. Темченко С.О. Постановка та метод розв'язування задач оптимального проектування вихідних дифузоров газових турбін [Текст] / В.П. Субботович,

С.О. Темченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХП», 2010. – С. 319

Здобувачем розв'язані задачі оптимального проектування вихідного дифузора газової турбіни за умови незмінної геометрії кореневого обводу.

9. Темченко С.О. Постановка аеродинамічних задач для вісерадіального каналу [Текст] / В.П. Суботович, О.Ю. Юдін, С.О. Темченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХП», 2011. – С. 263

Здобувач удосконалив метод розв'язання прямої задачі: геометрія каналу задається у прямолінійній ортогональній повернутій системі координат, а розрахунок течії здійснюється у циліндровій системі координат.

10. Темченко С.О. Визначення параметрів вісесиметричного потоку в кінчному дифузорному каналі [Текст] / В.П. Суботович, Ю.О. Юдін, О.Ю. Юдін, С.О. Темченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – С. 285.

Здобувач виконав порівняння результатів випробувань кільцевого вихідного дифузора компресора з результатами даними власних розрахунків.

11. Темченко С.О. Метод проектування вісесиметричних каналів довільної форми [Текст] / С.О. Темченко // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації». частина 1, том Промислові технології. – Київ: НТУ «КП», 2012. № 3/2 (5). – С. 29–30.

12. Темченко С.О. Задачі підготовчого проектування вільних кільцевих вісерадіальних каналів [Текст] / В.П. Суботович, Ю.О. Юдін, О.Ю. Юдін, О.В. Лапузін, С.О. Темченко // XV Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика». матеріали конференції. – Мелітополь: ТДАТУ, 2014. – С. 112.

На основі загальноновизнаної методики визначення внутрішніх втрат в дифузорах розроблено алгоритм та програмний модуль їх розрахунку.

13. Темченко С.А. Метод повенечного расчета осевой турбины [Текст] / В.П. Субботович, А.Ю. Юдин, С.А. Темченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХП», 2014. – С. 300.

Здобувачем виконано розрахункове дослідження течії за вінцями турбіни.

14. Темченко С.А. О возможности уменьшения осевых размеров кольцевых диффузоров [Текст] / В.П. Субботович, Ю.А. Юдин, А.Ю. Юдин, С.А. Темченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції, – Харків: НТУ «ХП», 2015. – С. 295.

Здобувачем виконано оптимальне проектування безвідривних дифузорних каналів за умови обмежень на їх осьовий габарит.

Темченко С.О. Обернена аеродинамічна задача для оптимального проектування кільцевих дифузорних каналів турбомашин. 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, 2015.

Дисертація присвячена розробці перспективного методу розв'язання прямої та оберненої аеродинамічних задач для кільцевих перехідних та вихідних каналів турбомашин, який враховує особливості організації обчислювальних процесів при оптимальному проектуванні таких каналів.

Пряму та обернену задачі розділено на окремі підзадачі, незалежні одна від одної, які можна розв'язувати в будь-якій послідовності або одночасно. Це забезпечує можливість контролю форми будь-якої ділянки каналу, що проектується, і дозволяє значно скоротити час проектування. Окремі підзадачі розв'язуються методами нелінійного програмування, що не вимагає збереження істотних обсягів інформації.

На основі оберненої задачі розроблено методику оптимального проектування дифузорів. Спроектовано дифузор з криволінійними обводами із заданими ступенем розширення, осьовим та радіальним габаритами. Він має безвідрильний характер течії, низький рівень втрат та малу чутливість до зміни режимних параметрів у діапазонах, характерних для вихідних дифузорів компресорів і енергетичних газових турбін, а його осьовий габарит на 20% менший величини граничного осьового габариту передвідрильного дифузора з прямолінійними обводами та таким же ступенем розширення.

Ключові слова: турбомашини, вісесиметрична течія, кільцевий дифузор, пряма та обернена аеродинамічні задачі, оптимальне проектування.

Темченко С.А. Обратная аэродинамическая задача для оптимального проектирования кольцевых диффузорных каналов турбомашин. На правах рукописи.

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

Диссертация посвящена разработке метода решения прямой и обратной задач для кольцевых диффузорных каналов при условии осевой симметрии течения. Метод предназначен для использования при оптимальном проектировании переходных и выходных диффузорных каналов турбомашин.

В разработанном методе прямая и обратная задачи разделены на задаваемое число отдельных подзадач, независимых друг от друга, которые можно решать в любой последовательности или одновременно, что обеспечивает возможность контроля формы любого участка проектируемого канала и позволяет значительно сократить время проектирования. Отдельные подзадачи решаются

методами нелинейного программирования, что не требует хранения существенных объемов информации.

Разработаны методика оптимального проектирования кольцевых диффузоров на основе обратной задачи и комплекс компьютерных программ для решения прямой и обратной аэродинамических задач и задач оптимизации.

С помощью решения прямых задач определены распределения параметров потока по радиусу в межвенцовых и межступенчатых зазорах осевой турбины, что открывает перспективы оптимального проектирования многоступенчатых отсеков турбин по зазорам совместно с переходными или выходными кольцевыми диффузорными устройствами.

Используя методику оптимального проектирования кольцевых диффузоров, спроектирован высокоэффективный безотрывной диффузор при заданных степени расширения, осевом и радиальном габаритах. Диффузор мало чувствительный к изменению режимных параметров в диапазонах, характерных для выходных диффузоров компрессоров и энергетических газовых турбин, имеет низкий уровень коэффициента полных потерь и осевой габарит, который меньше на 20% предельного осевого габарита предотрывного диффузора с прямолинейными обводами и такой же степенью расширения.

Ключевые слова: турбомашина, осесимметричное течение, кольцевой диффузор, прямая и обратная аэродинамические задачи, оптимальное проектирование.

Temchenko S.O. Inverse problem for aerodynamic optimal design of turbomachinery annular diffuser ducts. Manuscript.

Thesis for degree of Candidate of Sciences in Technique for speciality 05.05.16 – turbomachine and turbine-installations. – National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute», Kharkiv, 2015.

The thesis is devoted to development of method for direct and inverse aerodynamic problems solution for annular transition and exhaust ducts of turbomachine, which takes into account the organization of computing processes of optimal design.

The direct and inverse problems are divided into separate subproblems, independent of each other, which can be solved in any order or simultaneously, providing the ability to control form any region of the projected duct, and permit significantly reduce design time. Individual subproblems are resolved nonlinear programming methods that do not require significant amounts of information storage.

Based on the method of inverse problem of optimum design of diffusers was developed. Designed diffuser with degree of expansion – two, axial and radial dimensions and curved outline, which has in-separation flow, low losses and low sensitivity to changes in operating condition in the ranges typical for exhaust diffuser compressors and power gas turbines, and its axial dimension to 20% lower limit value of the axial dimension to prior to separation diffuser with straight outline and the same degree of expansion.

Keywords: turbomachinery, axially symmetric flow, annular diffuser, direct and inverse problem, optimal design.

