

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Фан Конг Там



УДК 621.165:533.6

АЕРОДИНАМІЧНЕ УДОСКОНАЛЕННЯ
ЛОПАТКОВИХ АПАРАТІВ ТУРБОМАШИН НА ОСНОВІ
ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ

Спеціальність 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2010

Дисертація є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти та науки України, м. Харків

Науковий керівник: кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Суботович Валерій Петрович,
Національний технічний університет «ХПІ»,
професор кафедри турбінобудування

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


кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Роговой Михайло Іванович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків,
старший науковий співробітник відділу
оптимізації процесів та конструкцій
турбомашин

Захист відбудеться « 21 » жовтня 2010 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої ради Д64.050.11 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

Автореферат розісланий « 4 » вересня 2010 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук

 Ю.О. Юдін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з найголовніших задач енергетичного машинобудування і авіаційного двигунобудування, у тому числі і турбінобудування, є задача створення високоекономічних і надійних агрегатів. Важливість цієї проблеми значно зростає ще й у зв'язку з тим, що на теплових електростанціях України працює велика кількість потужних турбін, які відпрацювали свій ресурс. Ці турбіни були спроектовані на початку шестидесятих років минулого століття на базі розрахункових методів, які не дозволяли детально моделювати складні газодинамічні процеси в лопаткових апаратах та інших елементах проточних частин.

Проблему вдосконалення проточних частин парових і газових турбін на сьогоднішній день можна вирішити тільки за допомогою використання більш досконалих методів розрахунку течії в задачах оптимального проектування лопаткових апаратів турбомашин. Перспективним напрямом є використання оберненої задачі, яка дозволить створювати лопатки турбін з високою аеродинамічною якістю при значному скороченні часу, що витрачається на проектування та доведення. Дисертаційна робота присвячена вирішенню цієї актуальної проблеми.

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

Дисертаційна робота виконана на кафедрі турбінобудування НТУ «ХП» у рамках НДР МОН України: «Аеродинамічне вдосконалення ступенів турбін на основі розрахункових і експериментальних досліджень структури потоку в проточній частині» (ДР № 0106U001479, 2007-2008 рр.), «Розрахункові дослідження аеродинамічної досконалості профілів соплових і робочих лопаток парових турбін ТЕС і АЕС» (ДР № 0109U002388, 2009-2010 рр.), у яких здобувач брав безпосередню участь як виконавець.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення методу розв'язування прямої та оберненої задач розрахунку тривимірної течії на довільній вісесиметричній поверхні течії у міжлопаткових каналах решіток турбомашин, що ураховує особливості організації розрахункового процесу під час розв'язування задач оптимального проектування решіток з урахуванням профільних і кінцевих втрат. Для досягнення цієї мети були поставлені і вирішені наступні задачі:

- провести експериментальне дослідження решітки соплових профілів, які були спроектовані раніше на основі розв'язування двовимірної оберненої задачі, щоб підтвердити істотний вплив локальних хвилеподібних контурів профілю на зниження кінцевих втрат в решітках;

- розробити метод, який дозволяє розв'язувати пряму і обернену задачі для тривимірної течії на довільній вісесиметричній поверхні течії і забезпечує однаково високу точність розв'язування обох задач;

- визначити вплив параметрів течії та обертання турбінної решітки на геометричні характеристики профілів і аеродинамічну якість решіток;

- розв'язати задачу оптимального проектування решітки профілів з великим кутом повороту потоку за умов обмежень на міцність профілю та допустиму величину коефіцієнта профільних втрат.

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

Предмет дослідження: газодинамічні характеристики лопаткових апаратів турбомашин.

Методи дослідження. Експериментальні результати дисертації базуються на даних класичного аеродинамічного експерименту, проведеного за загально прийнятою методикою. Теоретичні положення базуються на фундаментальних основах газодинаміки, теорії решіток турбомашин та чисельних математичних методах. Зокрема, тривимірний сталий відносний рух ідеального газу описується рівняннями кількості руху, збереження енергії, процесу і нерозривності; звичайні диференціальні рівняння розв'язуються методом Рунге-Кутта; для розв'язання задач пошуку екстремумів функцій використано безумовні та умовні методи нелінійного програмування.

Наукова новизна одержаних результатів пов'язана з пошуком оптимальних газодинамічних характеристик проточної частини турбомашини і полягає у такому:

- вперше запропоновано метод, який дозволяє розв'язувати як обернену, так і пряму задачу для тривимірної течії на довільній вісесиметричній поверхні течії з єдиної методологічної позиції, і забезпечує однаково високу точність розв'язок обох задач;

- вперше обернена та пряма задачі для тривимірної течії розділені на незалежні одна від одної окремі підзадачі, які можна розв'язувати в будь-якій послідовності або одночасно, що забезпечує можливість контролювати окремі ділянки лопатки, яка проектується, з точки зору міцності та технологічності, та дозволяє значно скоротити час проектування, а окремі підзадачі розв'язуються методами нелінійного програмування, які не вимагають зберігання істотних обсягів інформації;

- визначено вплив параметрів течії у міжлопатковому каналі, нахилу поверхні течії та обертання решітки на геометричні характеристики профілів;

- розроблено методику оптимального проектування решіток профілів з великим кутом повороту потоку за умов обмежень як на міцнісні характеристики профілів, так і на величину коефіцієнта профільних втрат решітки.

Практичне значення одержаних результатів для турбінобудування полягає у наступному:

- розроблено метод для розрахунку тривимірної течії, що ураховує особливості організації розрахункового процесу під час оптимального проектування елементів проточних частин;

- розроблено комплекс комп'ютерних програм для розрахунку тривимірної течії в межах прямої і оберненої задач та для розв'язування задачі оптимального проектування решіток турбомашин, який може бути використаний у системах автоматизованного проектування турбоагрегатів;

- створено новий профіль з великим кутом повороту потоку для робочих решіток потужних парових турбін.

Результати досліджень використовуються на підприємстві ВАТ «Турбоатом» (акт від 21.04.2010 р.) і в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ» (акт від 06.05.2010 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, одержані здобувачем самостійно. У роботах, написаних і опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: виконані розрахункові дослідження впливу параметрів течії на геометричні характеристики профілів, спроектованих за допомогою обернених задач, що дозволяють вибирати

початковий варіант параметрів течії для оптимального проектування, який забезпечує задовільне виконання обмежень на міцність профілю та аеродинамічну якість решітки; розроблений алгоритм розв'язування прямої задачі на вісесиметричній поверхні течії і комплекс комп'ютерних програм для розрахунку течії в міжлопаткових каналах решіток турбомашин; розроблений алгоритм розв'язування оберненої задачі на вісесиметричній поверхні течії і комплекс комп'ютерних програм для побудови меж міжлопаткових каналів решіток турбомашин; розв'язані обернені задачі на кінцевих поверхнях обертання, побудовані профілі та визначені коефіцієнти профільних втрат решіток.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень за темою дисертації доповідалися й обговорювалися на: XV та XVIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2007 р., 2010 р.), III, IV, V та VI Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2007 р., 2008 р., 2009 р., 2010 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 4 наукових роботах, з яких 3 – у фахових наукових виданнях ВАК України.

Структура й обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, п'яти розділів основного тексту, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації становить 132 сторінок машинописного тексту і містить 57 рисунків, 6 таблиць, список використаних літературних джерел із 153 найменувань на 16 сторінках та додатки на 2-х сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, дана загальна характеристика дисертації.

У **першому розділі** зроблено огляд та аналіз існуючих методів розрахунку течії та методів оптимального проектування елементів проточної частини турбомашин. Обґрунтовано, що розроблення методів розв'язування задач розрахунку течії, які враховують вимоги і особливості організації обчислювального процесу в задачах оптимального проектування лопаткових апаратів проточних частин турбомашин, є актуальним.

У **другому розділі** наведені результати порівняльних експериментальних досліджень двох решіток профілів: решітки стандартних профілів Н4 та решітки профілів ОРТ2, контури яких були визначені в процесі оптимального проектування за допомогою двовимірної оберненої задачі.

У 2006 році на кафедрі турбінобудування НТУ «ХПІ» без участі здобувача була спроектована пряма решітка профілів соплових лопаток, яку назвали ОРТ2, з хвилеподібними контурами профілів. Форма профілів з відносною хордою $b/l=3$ була визначена із умови мінімуму коефіцієнта сумарних втрат решітки. Ці теоретичні дослідження показали, що хвилеподібність контура профілю може істотно впливати на рівень кінцевих втрат в решітці. Для $b/l=3$ розрахунковий коефіцієнт кінцевих втрат решітки профілів ОРТ2 був нижчим на 0,0245, ніж у решітки стандартних профілів Н4.

Метою цих експериментальних досліджень була перевірка розрахункових аеродинамічних характеристик решітки профілів ОРТ2, точності методики розрахунку кінцевих втрат і підтвердження можливостей методу оптимального проектування за допомогою оберненої задачі для двовимірної течії. Позитивні результати експериментальних досліджень решітки профілів ОРТ2, які наведені нижче, послужили підставою для розробки методу розв'язування прямої і оберненої задач для тривимірної течії, що відкриває шлях до проектування кільцевих решіток не тільки соплових, але і робочих лопаток турбомашин.

Основний режим випробування решіток профілів: число Маха $M_{1r}=0,4$; число Рейнольдса $Re_{1r}=5,25 \times 10^5$. Вимірювання параметрів потоку за решітками профілів виконувалися за допомогою пневмометричних зондів, встановлюваних на відстані від вихідних кромки, що дорівнює горлу решітки. Повний тиск вимірювався одноканальним зондом, приймальна частина якого виконана з трубки, що має зовнішній діаметр 0,8 мм, а внутрішній — 0,5мм.

Сумарні втрати решіток профілів ОРТ2 і Н4 стають рівними для $b/l=0,8$. При більших значеннях відношення b/l решітка профілів ОРТ2 має нижчі втрати, ніж решітка профілів Н4. Так, для $b/l=3$ різниця коефіцієнтів сумарних втрат досягає 0,022, а різниці коефіцієнтів кінцевих втрат – 0,027 (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльні характеристики решіток профілів

Решітка	$b/l=1,5$			$b/l=3,0$		
	ζ_{np}	ζ_k	ζ	ζ_{np}	ζ_k	ζ
профіль Н4	0,035	0,025	0,06	0,035	0,06	0,095
профіль ОРТ2	0,04	0,015	0,055	0,04	0,033	0,073

Зниження кінцевих втрат в значній мірі обумовлене кардинальною зміною характеру течії: у решітці профілів ОРТ2 форма ліній течії в більшій частині міжлопаткового каналу близька до прямолінійної. Поворот потоку здійснюється на двох відносно коротких ділянках. Перша ділянка розташована поблизу вхідного перетину решітки в зоні низьких швидкостей (тут кут повороту потоку дорівнює $\sim 25^\circ$, тобто складає приблизно третю частину від загального кута повороту $\sim 76^\circ$). Друга ділянка розташована усередині каналу до горлового перетину. На цій ділянці решітки, у зоні підвищених швидкостей, потік повертається на дві третини загального кута повороту потоку в каналі. Нижче за течією, у вихідній частині решітки, потік набуває напрям, що близький до прямолінійного. У сукупності таке управління течією приводить до зменшення кінцевих втрат, а саме їх складової, пов'язаної з перетіканнями робочого тіла з торцевої поверхні каналу на спинку профілю.

У третьому розділі розглянуто перспективний метод розв'язування прямої і оберненої задач на довільній вісесиметричній поверхні течії в міжлопаткових каналах решіток турбомашин.

Тонкий шар утворений двома поверхнями течії, відносно яких вважається, що вони мають вісь симетрії, співпадаючу з віссю турбомашини. Течію в шарі віднесемо до поверхні течії, що лежить посередині між вказаними поверхнями. Робоче тіло, що стискується, нев'язке, течія стала, адиабатична, і безвідривна, а повна ротальпія і показник ізоентропи залишаються постійними уздовж лінії течії.

Тривимірний сталий відносний рух ідеального робочого тіла описується у циліндровій системі координат θ, r, z трьома проекціями рівняння кількості руху у формі Ейлера

$$W_z \frac{\partial W_u}{\partial z} + W_r \frac{\partial W_u}{\partial r} + \frac{W_u}{r} \frac{\partial W_u}{\partial \theta} + \frac{W_r W_u}{r} + 2\omega W_r = -v \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta}, \quad (1)$$

$$W_z \frac{\partial W_r}{\partial z} + W_r \frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{W_u}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \theta} - \frac{W_u^2}{r} - \omega^2 r - 2\omega W_u = -v \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (2)$$

$$W_z \frac{\partial W_z}{\partial z} + W_r \frac{\partial W_z}{\partial r} + \frac{W_u}{r} \frac{\partial W_z}{\partial \theta} = -v \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (3)$$

рівняннями збереження енергії та ізоентропного процесу

$$\frac{k}{k-1} pv + \frac{W^2}{2} - \frac{u^2}{2} = const, \quad (4)$$

$$pv^k = const \quad (5)$$

і рівнянням нерозривності.

Виконаємо перехід від циліндрової системи координат θ, r, z до ортогональної системи координат (θ, l) , пов'язаної з серединною поверхнею шару (рис. 1). Тепер рівняння нерозривності має форму, визначену С.-Н. Wu,

$$\frac{\partial(\tau \rho W_l r)}{\partial l} + \frac{\partial(\tau \rho W_u)}{\partial \theta} = 0, \quad (6)$$

де $\tau = \tau l$ – нормальна товщина шару; ρ – щільність робочого тіла. Це дозволяє ввести функцію течії:

$$W_l = \frac{v}{\tau r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta}, \quad W_u = -\frac{v}{\tau} \frac{\partial \Psi}{\partial l}, \quad \text{ctg } \beta = -\frac{\partial \Psi}{\partial l} \bigg/ \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right). \quad (7)$$

Рівняння процесу (5) встановлює однозначний зв'язок між тиском і питомим об'ємом та їх похідними, тому питомим об'ємом можна не розглядати як незалежну змінну.

Таким чином, після переходу до системи координат (θ, l) та введена функція течії (7), для опису тривимірного сталого відносного руху ідеального газу на серединній поверхні шару ми маємо систему двох рівнянь, яка включає рівняння збереження енергії (4) і проекцію рівняння кількості руху на координатний напрям θ :

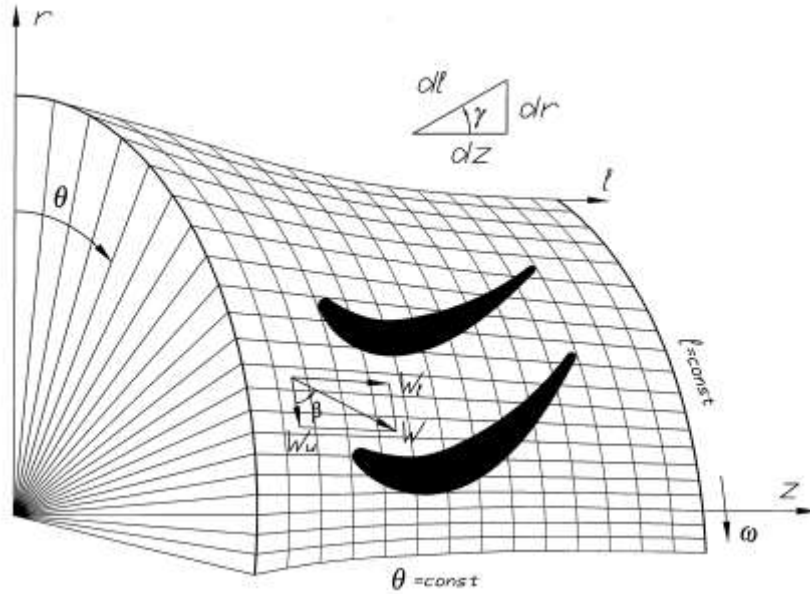


Рис. 1. Циліндрова система координат θ, r, z та ортогональна система координат центральний кут - меридіана (θ, l)

$$\frac{M_{w_i}^2 - 1}{M_{w_i}^2 + M_{w_u}^2 - 1} \frac{v}{\tau^2} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \left[\tau \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{1}{\tau} \frac{\partial \Psi}{\partial l} \right) + \frac{\text{ctg } \beta}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta \partial l} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial l} - \frac{2\omega \tau}{v} \right) \sin \gamma \right] -$$

$$- \frac{M_{w_i}^2}{M_{w_i}^2 + M_{w_u}^2 - 1} \frac{v}{\tau^2} \left[\frac{\text{ctg } \beta}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta^2} + \tau r \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{1}{\tau r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right) \right] + \frac{r A \sin \gamma}{v} \frac{M_{w_i} M_{w_u}}{M_{w_i}^2 + M_{w_u}^2 - 1} = \frac{\partial p}{\partial \theta}, \quad (8)$$

де $A = \frac{v^2}{r \tau^2} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial l} \right)^2 + \omega^2 r - 2\omega \frac{v}{\tau} \frac{\partial \Psi}{\partial l}$; M_{w_i} і M_{w_u} – числа Маха, визначені за компонентами швидкості потоку W_i і W_u ; $\Psi_{\theta, l} = m \bar{\Psi}_{\theta, l}$ – функція течії; m – масова витрата крізь шар в межах одного міжлопаткового каналу; $\bar{\Psi}$ – безрозмірна функція течії.

Виберемо вид безрозмірної функції течії. Зробимо це виходячи з того, що функція течії визначає розподіл масової витрати (для безрозмірної функції – частки витрати) у міжлопатковому каналі уздовж довільної кривої, яка сполучає точку на стороні розрідження каналу φ_s, l і точку на стороні тиску каналу φ_p, l .

Для перетину шару площиною $l = \text{const}$ абсолютна площа перетину змінюється від сторони розрідження до сторони тиску: $F_{\theta, l} = \tau r [\theta - \varphi_s, l]$, $\varphi_s, l \leq \theta \leq \varphi_p, l$. Відносна площа перетину при цьому лежить у межах $0 \leq \bar{F}_{\theta, l} \leq 1$. У якості безрозмірної функції течії використовується функцію наступного виду:

Задачу розділимо на дві підзадачі. Перша підзадача: для відомої частини масової витрати через шар m_1 знайти геометрію межі сторони тиску $\varphi_p = \varphi_p l$ і визначити в будь-якій точці поверхні течії між лінією течії, заданої залежністю $\varphi = \varphi l$, і шуканою межею каналу $\varphi_p = \varphi_p l$ параметри робочого тіла. Друга підзадача: для частини масової витрати $m_2 = m - m_1$ знайти геометрію межі сторони розрідження каналу $\varphi_s = \varphi_s l$ і визначити в будь-якій точці поверхні течії між лінією течії, заданої залежністю $\varphi = \varphi l$, і межею $\varphi_s = \varphi_s l$ параметри робочого тіла.

Обмежимося розглядом першої підзадачі, оскільки перша і друга підзадачі мають алгоритми розв'язування, які збігаються з точністю до індексів, що позначають сторони тиску і розрідження.

Задачі в перетинах $l = const$ назвемо окремими задачами. Окремі задачі будуть незалежними одна від одної, якщо для перетина $l = l_i$ задані: 1) масова витрата крізь шар m_1 ; 2) повні тиск p^* і питомий об'єм v^* в перетині $l = l_{-1}$ перед каналом; 3) значення функції $\varphi = \varphi l$ та її похідних $\frac{d\varphi l}{dl}$, $\frac{d^2\varphi l}{dl^2}$ і $\frac{d^3\varphi l}{dl^3}$; 4) значення функції $W = W l$ та її похідних $\frac{dW l}{dl}$ і $\frac{d^2W l}{dl^2}$; 5) частота обертання решітки. Знайти координату межі сторони тиску $\varphi_p = \varphi_p l_i$ каналу і визначити в будь-якій точці перетину $l = l_i$ параметри робочого тіла.

Для точки $\theta_1 = \varphi l_i$, де відомі швидкість та її дві похідні, можна записати систему із трьох рівнянь

$$W^2 = W_l^2 + W_u^2, \quad \frac{d}{dl} W^2 = \frac{d}{dl} (W_l^2 + W_u^2), \quad \frac{d^2}{dl^2} W^2 = \frac{d^2}{dl^2} (W_l^2 + W_u^2), \quad (10)$$

у якій компоненти швидкості і їх похідні виразимо за допомогою похідних функції течії (9), що визначена для $l = l_i$ та $\varphi l \leq \theta \leq \varphi_p l$:

$$W^2 - \frac{v^2}{\tau^2} \left[\frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial l} \right)^2 \right] = 0.$$

$$W \frac{dW}{dl} + v M_w^2 \frac{dp}{dl} - \left(\frac{v}{r\tau} \right)^2 \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta \partial l} + \frac{ctg \beta}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial^2 \theta} \right) - \left(\frac{v}{\tau} \right)^2 \frac{\partial \Psi}{\partial l} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial^2 l} + \frac{ctg \beta}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial l \partial \theta} \right) + W_u^2 \frac{\sin \gamma}{r} + W^2 \frac{1}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial l} = 0.$$

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{dW}{dl} \right)^2 + W \frac{d^2W}{dl^2} + \frac{1}{k} \left[\frac{1}{p} W^2 \frac{d^2p}{dl^2} + 2W \frac{1}{p} \frac{dp}{dl} \frac{dW}{dl} - \frac{1}{p^2} \left(\frac{dp}{dl} \right)^2 W^2 \right] - \\
& - \left(\frac{1}{r\tau} \right)^2 \left[2v \frac{dv}{dl} \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} + v^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} \left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} + \frac{ctg\beta}{r} \frac{\partial^2\Psi}{\partial\theta^2} \right) \right] - \\
& - \left(\frac{1}{r\tau} \right)^2 v^2 \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \left(\frac{\partial^3\Psi}{\partial l^2 \partial\theta} + \frac{ctg\beta}{r} \frac{\partial^3\Psi}{\partial\theta^2 \partial l} \right) + \\
& + \left(\frac{1}{r\tau} \right)^2 \left[2v \frac{dv}{dl} \frac{\partial\Psi}{\partial z} \frac{\partial^2\Psi}{\partial\theta^2} + v^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial\theta^2} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial l^2} + \frac{ctg\beta}{r} \frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} \right) \right] + \\
& + \left(\frac{1}{r\tau} \right)^2 v^2 \frac{\partial\Psi}{\partial l} \left(\frac{\partial^3\Psi}{\partial\theta^2 \partial l} + \frac{ctg\beta}{r} \frac{\partial^3\Psi}{\partial\theta^3} \right) - \\
& - \left(\frac{1}{\tau} \right)^2 \left[2v \frac{dv}{dl} \frac{\partial\Psi}{\partial l} \frac{\partial^2\Psi}{\partial l^2} + v^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial l^2} \left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial l^2} + \frac{ctg\beta}{r} \frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} \right) \right] - \\
& - \left(\frac{1}{\tau} \right)^2 v^2 \frac{\partial\Psi}{\partial l} \left(\frac{\partial^3\Psi}{\partial l^3} + \frac{ctg\beta}{r} \frac{\partial^3\Psi}{\partial l^2 \partial\theta} \right) + \left(\frac{1}{\tau} \right)^2 2v \frac{dv}{dl} \left(\frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \right)^{-1} \left(\frac{\partial\Psi}{\partial l} \right)^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} - \\
& - \left(\frac{1}{\tau} \right)^2 v^2 \left(\frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \right)^{-2} \left(\frac{\partial\Psi}{\partial l} \right)^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} \left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} + \frac{ctg\beta}{r} \frac{\partial^2\Psi}{\partial\theta^2} \right) + \\
& + \left(\frac{1}{\tau} \right)^2 \left[2v^2 \left(\frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \right)^{-1} \left(\frac{\partial\Psi}{\partial l} \right) \frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} \left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial l^2} + \frac{ctg\beta}{r} \frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} \right) \right] + \\
& + \left(\frac{1}{\tau} \right)^2 v^2 \left(\frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \right)^{-1} \left(\frac{\partial\Psi}{\partial\tau} \right)^2 \left(\frac{\partial^3\Psi}{\partial l^2 \partial\theta} + \frac{ctg\beta}{r} \frac{\partial^3\Psi}{\partial\theta^2 \partial l} \right) + \\
& + v^2 \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \cdot \frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} \cdot \frac{2}{r} \left(\frac{\sin\gamma}{\tau} + \frac{1}{\tau} \frac{\partial\tau}{\partial l} \right) - v^2 \frac{\partial\Psi}{\partial l} \cdot \frac{\partial^2\Psi}{\partial\theta^2} \cdot \frac{2}{r} \left(\frac{\sin\gamma}{\tau} + \frac{1}{\tau} \frac{\partial\tau}{\partial l} \right) + \\
& + v^2 \frac{\partial\Psi}{\partial l} \cdot \frac{\partial^2\Psi}{\partial l^2} \cdot \frac{2}{\tau^3} \frac{\partial\tau}{\partial l} - v^2 \frac{1}{\frac{\partial\Psi}{\partial\theta}} \cdot \left(\frac{\partial\Psi}{\partial l} \right)^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} \frac{2}{\tau^3} \frac{\partial\tau}{\partial l} + \\
& + \frac{\sin\gamma}{r} \left[\frac{1}{r\tau} \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \frac{dv}{dl} + \frac{1}{r\tau} \left(v \frac{\partial^2\Psi}{\partial l \partial\theta} + v ctg\beta \frac{\partial^2\Psi}{\partial\theta^2} \right) - \frac{\sin\gamma}{r^2} \frac{v}{\tau} \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} - \frac{v}{r\tau^2} \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \frac{\partial\tau}{\partial l} \right] - \\
& - \frac{v}{r\tau^3} \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \sin^2\gamma + \frac{v}{r\tau^2} \frac{d^2r}{dl^2} \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} + \frac{dW}{dl} \frac{1}{\tau} \frac{\partial\tau}{\partial l} - W \frac{1}{\tau^2} \left(\frac{\partial\tau}{\partial l} \right)^2 + \frac{W}{\tau} \frac{\partial^2\tau}{\partial l^2} = 0
\end{aligned}$$

Якщо вектор незалежних змінних X функції (9) заданий, тоді ми маємо систему трьох алгебраїчних рівнянь з трьома невідомими φ_p , $\frac{d\varphi_p}{dl}$, $\frac{d^2\varphi_p}{dl^2}$, яка розв'язується аналітично. Після розв'язання системи рівнянь (10) виберемо в перетині $l = l_i$ рівновіддалені точки θ_j , $j = \overline{1, N}$, $\theta_1 = \varphi l_i$, $\theta_N = \varphi_p l_i$, $N \gg 3h + 1$, для яких обчислимо значення функції течії та її часткових похідних.

У точці $\theta_1 = \varphi l_i$ відома швидкість потоку і нескладно знайти тиск p_1 із рівняння (4). Далі ми можемо розв'язати диференціальне рівняння (8) як задачу Коши $\frac{dp}{d\theta} = f(\theta, p)$ у інтервалі $[\varphi l_i, \varphi_p l_i]$. Отже, при заданих компонентах

вектора X для визначення розподілу параметрів потоку у перетині $l = l_i$ можна знайти величини тиску p_j в точках з номерами $j = 2, 3, \dots, N$ і обчислити бракуючі параметри потоку. Проте для розв'язання системи рівнянь (4) і (8) цього не досить, тому що виконання рівняння збереження енергії (4) гарантоване тільки в єдиній точці $\theta_1 = \varphi l_i$, в якій було знайдено граничну умову задачі Коши. У всіх інших точках θ_j виконання рівняння (4) залежить від вибору компонентів вектора X . Тому для знаходження розв'язка системи рівнянь (4) і (8) пропонується розв'язати еквівалентну задачу нелінійного програмування. Незалежні змінні такої задачі – компоненти вектора X , а цільова функція складається з кількісних оцінок виконання рівняння (4) в точках θ_j , $j = 2, \overline{N}$, а саме: масова витрата крізь шар, очікувана з рівняння (4) для точки з номером j

$$m_{w_j} = \frac{\tau_i}{v_j} \sqrt{\left[\frac{2k}{k-1} p^* v^* - p_j v_j - \Delta u_i^2 \right] / \left[\left(\frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial l} \right)_j^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \theta} \right)_j^2 \right]}, \quad (11)$$

і задана масова витрата крізь шар m_1 не повинні розрізнятися.

Алгоритм обчислення цільової функції: 1) у кожній точці θ_j , $j = \overline{1, N}$ обчислити функцію течії (9) і її похідні; 2) визначити φ_p , $\frac{d\varphi_p}{dl}$, $\frac{d^2\varphi_p}{dl^2}$ із системи рівнянь (10); 3) для точки з номером $j=1$ за допомогою рівняння (4) визначити тиск – граничну умову задачі Коши; 4) розв'язати задачу Коши і знайти очікувані масові витрати m_{w_j} за допомогою формули (11); 5) обчислити цільову функцію за формулою

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

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

Розглянемо пряму задачу. Задані: 1) масова витрата m крізь шар для одного міжлопаткового каналу; 2) повні тиск p^* і питомий об'єм v^* у перетині $l = l_{-1}$ перед каналом; 3) координати межі сторони розрідження $\varphi_s = \varphi_s l$ і межі сторони тиску $\varphi_p = \varphi_p l$; 4) частота обертання решітки. Знайти в будь-якій точці серединної поверхні течії параметри робочого тіла.

Окремі задачі будуть незалежними одна від одної, якщо для перетина $l = l_i$ задані: 1) масова витрата крізь шар m ; 2) повні тиск p^* і питомий об'єм v^* в перетині $l = l_{-1}$ перед каналом; 3) координати меж перетину $\varphi_s = \varphi_s l_i$ і

$\varphi_p = \varphi_p l_i$; 4) величини похідних $\frac{d\varphi_s l_i}{dl}$, $\frac{d\varphi_p l_i}{dl}$, $\frac{d^2\varphi_s l_i}{dl^2}$ та $\frac{d^2\varphi_p l_i}{dl^2}$; 5) частота обертання решітки.

Окрема задача сформульована так: знайти такий вектор x , щоб розподіл тиску, одержаний в результаті розв'язування задачі Коши у інтервалі $[\varphi_s l, \varphi_p l]$, забезпечував збігання очікуваних (11) та заданої масових витрах в точках θ_j , $j = \overline{1, N}$. Для визначення граничної умови задачі Коши в одній із точок перетину θ_j , $j = \overline{1, N}$ знайдемо тиск p_j із рівняння (4), для чого розв'яжемо задачу мінімізації функції $g^2 p_j$, де

$$g p_j = \frac{2k}{k-1} p^* v^* - p_j v_j - \left(m \frac{v_j}{\tau_i} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial l} \right)_j^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \theta} \right)_j^2 \right] - u_i^2 + u_{-1}^2.$$

Зазначимо, що окрема пряма задача є складнішою за окрему обернену задачу в тому сенсі, що у оберненій задачі система рівнянь (10) розв'язується аналітично, а у прямій задачі треба шукати граничну умову задачі Коши чисельними методами.

У четвертому розділі наведені результати розрахунків течії та проектування профілів робочої решітки газової турбіни за допомогою розробленого методу розв'язування прямої та оберненої задач.

Для дослідження впливу форми поверхні течії і обертання решітки на характеристики течії в її міжлопаткових каналах вибрана робоча решітка трансзвукової турбіни авіаційного турбореактивного двигуна. Пряма задача була розв'язана на циліндровій поверхні течії, а потім – на декількох конічних поверхнях для нерухої та рухої решітки. Обернена задача – задача проектування нових профілів – розв'язувалася за однакових умов завдання геометрії середньої лінії течії і розподілу швидкості потоку уздовж неї на тих же конічних поверхнях для нерухої та рухої решітки. На конічних поверхнях течії пряма і обернена задачі розв'язувалися для постійного кроку решітки, який був визначений по вихідній кромці, та незмінних числі Маха за вихідною швидкістю та кути входу потоку в решітку.

У п'ятому розділі наведені результати оптимального проектування профілю робочої решітки потужної парової турбіни.

Відповідно до розробленої методики оптимального проектування решітки профілів з великим кутом повороту потоку за наявності обмежень як на міцність профілю (локальна товщина профілю, площа профілю, моменти опору), так і на величину коефіцієнта профільних втрат решітки, в процесі оптимізаційного пошуку зберігаються незмінними: 1) масова витрата крізь міжлопаткових канал; 2) параметри робочого тіла в перетині перед каналом: повні тиск і питомий об'єм, наприклад; 3) дванадцять граничних умов для швидкості потоку (рис. 5): $W_{cp}(z_A)$,

$$W_{cp}(z_B), W_{cp}(z_C), W_{cp}(z_D), \frac{dW_{cp}(z_A)}{dz}, \frac{dW_{cp}(z_B)}{dz}, \frac{dW_{cp}(z_C)}{dz}, \frac{dW_{cp}(z_D)}{dz}, \frac{d^2W_{cp}(z_A)}{dz^2},$$

$$\frac{d^2W_{cp}(z_B)}{dz^2}, \frac{d^2W_{cp}(z_C)}{dz^2} \text{ та } \frac{d^2W_{cp}(z_D)}{dz^2};$$

4) дванадцять граничних умов для функції $\varphi_{cp} = \varphi_{cp} z$, яка визначає геометрію середньої лінії течії: $\varphi_{cp}(z_A)$, $\varphi_{cp}(z_B)$, $\varphi_{cp}(z_C)$,

$\varphi_{cp}(z_D), \frac{d\varphi_{cp}(z_A)}{dz}, \frac{d\varphi_{cp}(z_B)}{dz}, \frac{d\varphi_{cp}(z_C)}{dz}, \frac{d\varphi_{cp}(z_D)}{dz}, \frac{d^2\varphi_{cp}(z_A)}{dz^2}, \frac{d^2\varphi_{cp}(z_B)}{dz^2}, \frac{d^2\varphi_{cp}(z_C)}{dz^2}$
та $\frac{d^2\varphi_{cp}(z_D)}{dz^2}$. Завдання цих граничних умов дозволяє нам зберегти незмінними

координати і розміри вхідного і вихідного горлових перетинів міжлопаткового каналу, а також зберегти координати і товщину вхідної і вихідної кромок.

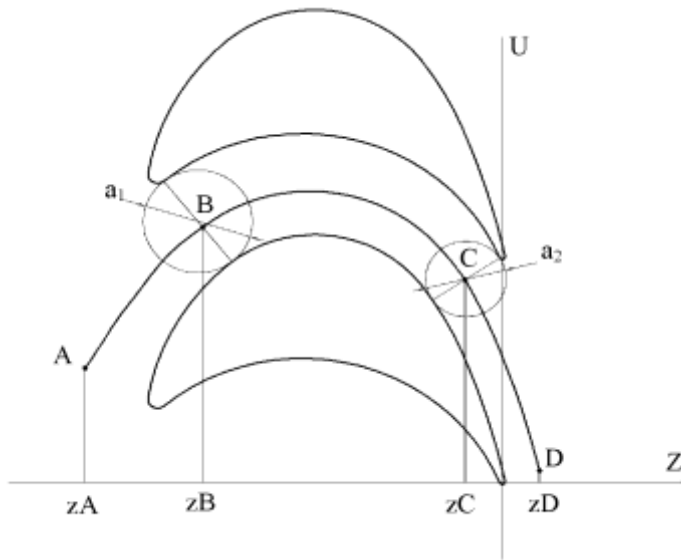


Рис. 5. До постановки задачі оптимізації

Незалежними змінні задачі оптимізації вибрані коефіцієнти трьох пар поліномів

$$\varphi_{cp} = \varphi_{cp}(z, x_{v+1}, x_{v+2}, \dots, x_n) \text{ та}$$

$$W_{cp} = W_{cp}(z, x_1, x_2, \dots, x_v),$$

які визначають геометрію середньої лінії течії та розподіл швидкості потоку на трьох ділянках АВ, ВС і CD. Цільова функція – коефіцієнт кінцевих втрат решітки профілів.

Коефіцієнт профільних втрат визначався із розрахунків турбулентного примежового шару за методикою Лойцяньського Л.Г., а

коефіцієнт кінцевих втрат – за методикою Гречаніченко Ю.В.

Як початкова решітка для оптимального проектування була вибрана робоча решітка першого ступеня ЦВТ парової турбіни К-220-44 ВАТ «Турбоатом» з лопатками постійного по висоті профілю (стандартний профіль Р2).

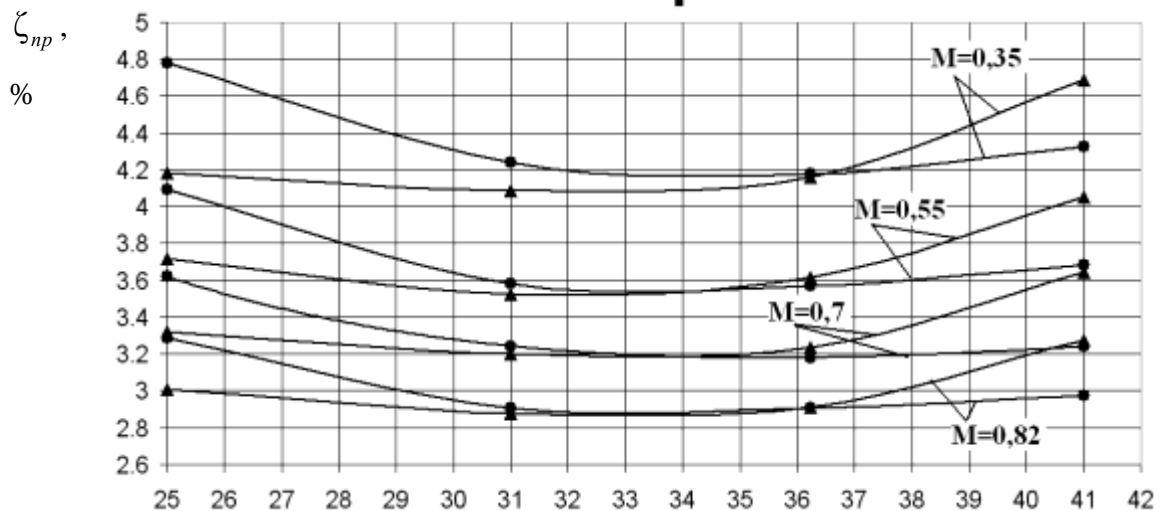


Рис. 6. Залежність коефіцієнта профільних втрат ζ_{np} від кута натікання для решіток профілів Р2 —▲— та РТ1 —●—

Для порівняння ефективності решітки профілів P2 та решітки нових профілів PТ1 при різних кутах входу, були проведені чисельні експерименти за допомогою CFD-програми. У двовимірній постановці оцінювалися коефіцієнти профільних втрат решіток і розподіл параметрів в міжлопаткових каналах. З рис. 6 видно, що для чисел Маха 0,55, 0,7 та 0,82, якщо кут натікання менше 32° , то коефіцієнт ζ_{np} решітки профілів PТ1 більш ніж у решітки P2, а якщо кут натікання міняється від 32° до 36° , профільні втрати цих решіток практично рівні, та коли кут натікання більше 36° , тоді профільні втрати у решітки профілів PТ1 ростуть значно повільніше, ніж у решітки профілів P2.

В результаті спроектовано профіль для робочих решіток, який має локальні хвилеподібні контури, що забезпечує істотне зниження коефіцієнту кінцевих втрат решіток ζ_k . У робочій решітці першого ступеня ЦВТ турбіни К-220-44 з $b/l=1,2$ та $D_{cp}/l=17$ кут натікання змінюється від 30° у кореня до 46° на периферії, і тому заміна профілю P2 на профіль PТ1 у цій решітці зменшить її коефіцієнт сумарних втрат на 0,008.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу створення методу розв'язування прямої і оберненої задач для тривимірної течії в решітках турбомашин з метою його застосування під час оптимального проектування лопаткових апаратів. Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у такому:

1. Фізичний експеримент підтвердив високу ефективність решітки профілів ОРТ2, яка має нижчі сумарні втрати, ніж решітка профілів Н4, що свідчить про істотність впливу хвилеподібних контурів профілю на рівень кінцевих втрат.

2. Позитивні результати експериментальних порівняльних досліджень решіток профілів ОРТ2 і Н4 стали підставою для розробки методу розв'язування прямої і оберненої задач для тривимірної течії, що відкрило шлях до оптимального проектування кільцевих решіток не тільки соплових, але і робочих лопаток турбомашин на основі обернених задач.

3. Для перспективного методу розв'язування прямої та оберненої задач для тривимірної течії шляхом введення функції течії система з шести рівнянь, що описує тривимірну сталу нев'язку течію робочого тіла, що стискається, на довільній поверхні обертання, зведена до системи з двох рівнянь, одне з яких – алгебраїчне, а друге – диференціальне рівняння.

4. Розроблений метод розв'язування прямої і оберненої задач дозволяє враховувати вплив частоти обертання решітки, форми поверхні течії і граничних умов на геометричні характеристики профілів.

5. Частота обертання ротора і форма поверхні течії впливають на розподіли параметрів потоку в міжлопаткових каналах решіток. Цей вплив може привести до підвищення втрат в решітках, тому його необхідно враховувати в процесі проектування решіток соплових і робочих лопаток.

6. Розроблена методика оптимального проектування решіток з великим кутом повороту потоку на основі методу розв'язування прямої і оберненої задач, яка

дозволяє проектувати решітки турбомашин за умов обмежень на міцність профілю та рівень профільних втрат.

7. Виконано оптимальне проектування профілю робочої лопатки при заданих обмеженнях на міцність профілю та рівень коефіцієнта профільних втрат решітки. Коефіцієнт кінцевих втрат решітки нових профілів нижчий на 0,6%, ніж у решітці стандартних профілів Р2.

8. Результати досліджень впроваджені при розробці вдосконалених профілів соплових лопаток парових турбін ТЕС та АЕС на підприємстві ВАТ «Турбоатом» та в навчальний процес кафедри турбінобудування НТУ «ХП», зокрема в лекційні курси «Вибіркові глави теорії парових турбін» і «Інформаційні технології проектування турбомашин».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фан Конг Там Результати профилювання с помощью обратной задачи теории решеток турбомашин / Субботович В.П., Юдин А.Ю., Фан Конг Там // Вісник Національного технічного університету «ХП». – Харків: НТУ «ХП». - 2007. – № 2. – с. 31-35.

2. Фан Конг Там Обтекание трехмерным потоком решетки профилей турбомашин на поверхности вращения / Субботович В.П., Юдин А.Ю., Фан Конг Там // Вісник Національного технічного університету «ХП». – Харків: НТУ «ХП». – 2008. – № 6 – с. 41-46.

3. Фан Конг Там Обратная задача теории решеток на осесимметричной поверхности тока / Субботович В.П., Юдин А.Ю., Фан Конг Там // Вісник Національного технічного університету «ХП». – Харків: НТУ «ХП». - 2009. – № 3. – С. 56-61.

4. Фан Конг Там Результати розв'язування оберненої задачі на кінцевих поверхнях обертання для робочих решіток / Субботович В.П., Юдин О.Ю., Фан Конг Там // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І. – Харків: НТУ «ХП». - 2010. – С. 320.

АНОТАЦІЇ

Фан Конг Там Аеродинамічне удосконалення лопаткових апаратів турбомашин на основі обернених задач. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2010.

Дисертація присвячена розробленню методу розв'язування прямої і оберненої задач для тривимірної течії в шарі змінної товщини на вісесиметричній поверхні течії. Підставою для цього послужили позитивні результати проведених здобувачем експериментальних досліджень решітки соплових профілів, спроектованої за допомогою оберненої задачі для двовимірної течії.

У розробленому методі пряма та обернена задачі розділені на незалежні одна від одної окремі підзадачі, які можна розв'язувати в будь-якій послідовності або одночасно, що забезпечує можливість контролювати окремі ділянки лопатки,

що проектується, з точки зору міцності та технологічності, та дозволяє значно скоротити час проектування, а окремі підзадачі розв'язуються методами нелінійного програмування, які не вимагають зберігання істотних обсягів інформації.

Розроблено методику оптимального проектування решіток профілів з великим кутом повертання потоку. Спроектвана робоча решітка для циліндру високого тиску потужної парової турбіни, профіль якої має локальні хвилеподібні контури, а її коефіцієнт кінцевих втрат значно нижчий, ніж у решітки атласних профілів.

Ключові слова: турбомашина, тривимірна течія, межлопатковий канал, профіль решітки, обернена задача.

Фан Конг Там Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов турбомашин на основе обратных задач. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – Турбомашины и турбоустановки. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2010.

Диссертация посвящена разработке метода решения прямой и обратной задач для трехмерного течения в слое переменной толщины на осесимметричной поверхности тока. Метод разработан для использования при оптимальном проектировании лопаточных аппаратов турбомашин.

Обзор литературных источников показал, что применение существующих методов решения прямой и обратной задачи для трехмерного течения при оптимальном проектировании решеток турбомашин связано с большими проблемами, а разработка метода решения этих задач, учитывающего особенности организации процесса оптимизационного поиска, открывает новые перспективы для проектирования. Основанием для разработки метода послужили также положительные результаты экспериментальных исследований решетки сопловых профилей с волнообразными очертаниями корытца и спинки, спроектированной с помощью обратной задачи для двухмерного течения, которые были проведены соискателем.

В разработанном методе прямая та обратная задачи разделены на независимые одна от другой отдельные подзадачи, которые можно решать в любой последовательности или одновременно. Благодаря этому обеспечивается возможность контролировать любой участок проектируемой лопатки с точки зрения прочности и технологичности, что позволяет значительно сократить время проектирования. А отдельные подзадачи решаются методами нелинейного программирования, которые не требуют хранения существенных объемов информации.

Разработан комплекс компьютерных программ для расчета течения в рамках прямой и обратной задачи и для решения задач оптимального проектирования сопловых и рабочих турбинных решеток. Определены параметры течения в межлопаточных каналах для неподвижной и вращающейся турбинной решетки, используя решения прямой задачи, а также спроектированы межлопаточные каналы решеток с помощью решения обратной задачи и показано влияние вращения, формы поверхности тока и граничных условий обратной задачи на

коэффициент профильных потерь решетки и геометрические характеристики профилей.

Используя разработанный метод, решена задача оптимального проектирования рабочей решетки с лопатками постоянного по высоте профиля цилиндра высокого давления мощной паровой турбины при ограничениях на локальные толщины профиля, площадь профиля и моменты сопротивления, а также на допустимый уровень коэффициента профильных потерь решетки. Спроектирована новая рабочая решетка, профиль которой имеет локальные волнообразные очертания корытца и спинки, а коэффициент вторичных потерь значительно ниже, чем у исходной решетки с атласными профилями Р2. Новая рабочая решетка имеет более низкие коэффициенты как вторичных, так и профильных потерь на режиме проектирования и удовлетворительно работают в широком диапазоне углов атаки.

Ключевые слова: турбомашина, трехмерное течение, межлопаточный канал, профиль решетки, обратная задача.

Phan Cong Tam Aerodynamic improvement of turbo-machine blade cascades on the basis of inverse problems. – Manuscript

Dissertation for the candidate of technical sciences degree in specialty 05.05.16 – Turbo-machines and turbo-installations. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». – Kharkiv, 2010.

The dissertation is devoted to the development of method for the solution of direct and inverse problems of three-dimensional flow in cascades of turbo-machines in a layer of variable thickness at the axial-symmetric stream surface. The positive results of the tests of nozzle cascade which was designed by means of two-dimension inverse problem were hold by the competitor and used as basis.

In the developed method direct and inverse problems are divided into separate sub-problems. They can be solved in any sequence or at the same moment, which provides the possibility to control designed blade's separate zones regarding its strength and processibility and allows decreasing the design time greatly. Separate sub-problems are solved by methods of non-linear programming, which do not demand saving of large amount of information.

The technology of optimal design for blade cascade with big angle of flow swirl is developed. The rotor cascade of power high pressure steam turbine is designed, profiles of which have pressure side and suction side with local wavy contours and the coefficient of second losses is much lower than atlas cascades' profiles have.

Keywords: turbomachine, three-dimensional flow, blade channel, cascade profile, inverse problem.



Підписано до друку 30.08.2010 р. Формат 60x80/14 Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Замовлення 19
Видавництво та друкарня ПП «Технологічний Центр»,
м. Харків, вул. Новгородська, 3а, Тел. 750-89-90